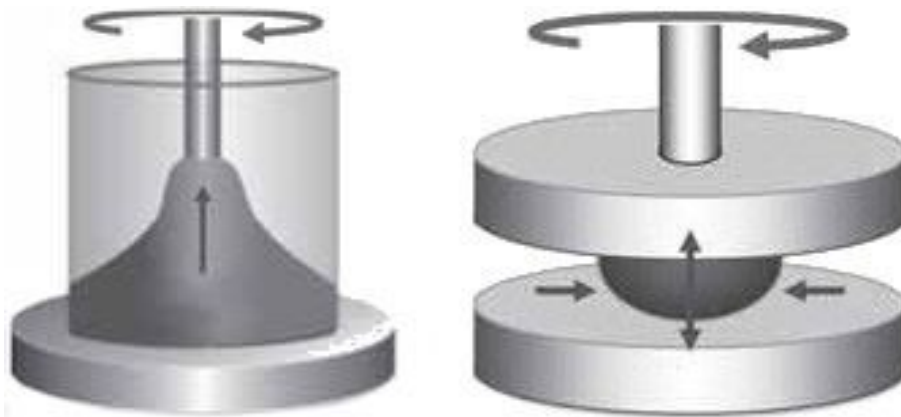


І. О. Мікульонок
Л. Б. Радченко

МОДЕЛЮВАННЯ ДИСКОВИХ ЕКСТРУДЕРІВ ДЛЯ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ



*І. О. Мікульонок
Л. Б. Радченко*

МОДЕЛЮВАННЯ ДИСКОВИХ ЕКСТРУДЕРІВ ДЛЯ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Монографія

Київ
НТУУ «КПІ»
2015

УДК 678.027.3:678.073.001.57
ББК 35.71/73
М59

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут»
(Протокол № 8 від 05.10.2015 р.)*

Рецензенти: *О. М. Гавва*, д-р техн. наук, проф.,
Національний університет харчових технологій

О. С. Парфенюк, д-р техн. наук, проф.,
Донецький національний технічний університет

Мікульонок І.О.

М59 Моделювання дискових екструдерів для перероблення полімерних матеріалів [Текст] : монографія / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 103[1] с.: іл. – Бібліогр.: с. 95–101. – 300 прим.
ISBN 978-966-622-732-7

У монографії розглянуто наукові засади проектування та вдосконалення одного з різновидів екструзійного обладнання для перероблення термопластичних матеріалів – дискових і комбінованих екструдерів.

Змодельовано процеси, які проходять в екструзійному обладнанні для перероблення полімерів і пластичних мас на етапах подачі, плавлення, змішування та гомогенізації розплаву термопластичних матеріалів.

Розроблено методики розрахунку екструзійного обладнання, які з достатньою для інженерних розрахунків точністю надають можливість виконувати багатоваріантні розрахунки під час проектування нового й модернізації існуючого обладнання.

Для фахівців полімерного машинобудування та споріднених галузей виробництва, а також викладачів, аспірантів і студентів інженерно-хімічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

УДК 678.027.3:678.073.001.57
ББК 35.71/73

ISBN 978-966-622-732-7

© І. О. Мікульонок,
Л. Б. Радченко, 2015
© НТУУ «КПІ» (ІХФ), 2015

ВСТУП

В умовах сучасного стану промисловості України для підвищення її конкурентоспроможності постає завдання одержання високоякісної продукції за умови мінімального споживання енергетичних і матеріальних ресурсів. Під час конструювання обладнання для одержання й перероблення полімерів і пластичних мас це завдання пов'язане з пошуком параметрів, за яких для певної продуктивності забезпечуються задані параметри розплаву на виході відповідного обладнання за мінімально потрібних для перероблюваного матеріалу питомих енергетичних витрат.

Виробництво виробів з полімерних матеріалів пов'язано з попереднім приготуванням розплаву й необхідності його гранулювання, результатом якого є одержання стабільних за формою й розмірами гранул, які потім переробляють на різноманітну продукцію.

Застосування компактних змішувальних пристроїв передусім динамічного типу на стадії одержання виробів дає змогу на 30–50 % знизити енергоємність, а також підвищити якість виробів за рахунок зниження рівня деструкції й поліпшення змішування, ефективно переробляти полімерні відходи.

Збільшення виробництва й розширення асортименту полімерів і пластмас вимагають розробки ефективного обладнання для їх перероблення. Одночасно з освоєнням у виробництві одно- і двочерв'ячних екструдерів різних типорозмірів і призначення були розроблені достатньо універсальні конструкції дискових і комбінованих черв'ячно-дискових екструдерів, дія яких ґрунтується передусім на ефекті Вайссенберга (ефекті нормальних напружень) [3, 4, 9, 17, 20, 33, 34, 65, 73].

Незважаючи на відносно невисокий робочий тиск дискові екструдери мають певні переваги перед черв'ячними екструдерами: високий змішувальний ефект, малий час перероблення матеріалу в екструдері, більш просту конструкцію й менші матеріало- та енергоємність. При цьому тиск на виході з дискового екструдера можна підвищити, наприклад, за допомогою шестеренного насоса. Особливо ефективно дискові екструдери можна використовувати в технологічних схемах гранулювання полімерів (у тому числі й вторинних), а також на стадії підготовки розплаву в каскадних схемах виробництва наповнених композицій. Ці екструдери є достатньо універсальними, оскільки дають змогу здійснювати перероблення найрізноманітніших полімерів і композицій з їх використанням без зміни їхньої конструкції.

Натепер провідні підприємства й фірми з виготовлення обладнання для перероблення полімерних матеріалів пропонують обладнання, яке призначене для перероблення аналогічних матеріалів, але яке в той же час за однієї продуктивності може істотно відрізнитися конструкцією робочих органів і режимами роботи, що спричинює певні складнощі у виробничників під час вибору обладнання. У зв'язку з цим зростає значення математичного моделювання

процесів перероблення полімерних матеріалів, яке робить можливим для певного матеріалу числовим моделюванням здійснювати пошук як геометрії робочих органів обладнання, так і режимів перероблення. Також математичне моделювання робить можливим з великої різноманітності обладнання вибрати саме те, яке забезпечує потрібні властивості продукції.

Саме математичне моделювання є основою застосування систем автоматизованого проектування надзвичайно складних процесів перероблення полімерних матеріалів, розробки відповідних алгоритмів і програм розрахунків основних параметрів обладнання. Це дає можливість одержати в автоматизованому режимі основні параметри обладнання (продуктивність, потужність, зусилля, основні розміри і т.д.) з метою раціонального проектування, підвищення питомих показників, зниження матеріало- та енергоємності тощо. Адже математичне моделювання є найбільш досконалим та ефективним методом моделювання, що відкриває шлях для застосування сучасних потужних методів математичного аналізу, обчислювальної математики і програмування під час дослідження та оптимізації технологічних процесів [30, 32]. Математичне моделювання є дієвим засобом збереження та ефективного використання багатьох видів ресурсів: сировинних, енергетичних, людських, часових та ін.

У монографії виконано математичне моделювання основних процесів перероблення термопластичних полімерних матеріалів у дискових та комбінованих екструдерах екструзійних технологічних лініях різного призначення, розроблено алгоритми розрахунків, а також наведено результати експериментальних досліджень і відповідних розрахунків.

Результати досліджень впливу конструктивних особливостей дискових та комбінованих екструдерів для перероблення полімерних матеріалів, режимів його експлуатації і властивостей зазначених матеріалів на параметри процесів переробки стали науковою основою розробки та впровадження методик і рекомендацій щодо вибору принципів схем, проектування й виготовлення екструзійного обладнання, а також визначення раціональних режимів його експлуатації, які забезпечили підвищення продуктивності і зменшення енергоємності відповідного обладнання, а також поліпшення якості одержуваних матеріалів і виробів (ПАТ «НВП „Більшовик”», Український НДІ з розробки машин та устаткування з переробки пластичних мас, гуми і штучної шкіри – УкрНДІпластмаш, м. Київ, та ін.).

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

b – ширина нарізки циліндричної частини диска, м;
 B – ширина полімерної пробки в каналі, м;
 C – масова теплоємність, Дж/(кг·К);
 D – діаметр, м;
 E – ширина гребеня витка, м;
 g – прискорення вільного падіння, м/с²;
 G – витрата;
 h – висота каналу, м;
 i – масова ентальпія, Дж/кг;
 k – кількість заходів нарізки диска;
 L – довжина, м;
 n – частота обертання диска, об/с;
 N – потужність, Вт;
 p – тиск, Па;
 q – поверхнева густина теплового потоку, Вт/м²;
 q_V – об'ємна густина теплового потоку, Вт/м³;
 S – крок гвинтової нарізки черв'яка, м;
 t – час, с;
 T – температура, °С;
 V – лінійна швидкість стінки робочого органу екструдера (м/с) або об'єм (м³);
 w, W – лінійна швидкість перероблюваного матеріалу, м/с;
 x, y, z – декартові прямокутні координати;
 α – кут конусності торцевої частини диска, ...°;
 $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с⁻¹;
 δ – товщина плівки розплаву, м;
 ε_0 – відносна похибка;
 λ – теплопровідність, Вт/(м·К);
 μ – ефективна в'язкість, Па·с;
 π – число «пі» (3,14159);
 ρ – густина, кг/м³;
 r, θ, z – циліндричні координати;
 τ – дотичні напруження, Па;
 φ – кут підйому гвинтової нарізки циліндричної частини диска, ...°;
 ψ – коефіцієнт заповнення каналу перероблюваним матеріалом.

Основні індекси:

i – стосується i -го елементу;
 V – стосується об'єму;
 x, y, z – стосується відповідної декартової прямокутної координати;

r, θ, z – стосується відповідної циліндричної координати;
вх – стосується входу;
дис – стосується дисипації;
з – стосується завантаження;
к – стосується кінця;
н – стосується насипного стану (при позначенні густини ρ) або нагрівника;
п – стосується плавлення термопластичного полімеру;
р – стосується розплаву;
с – стосується середньої величини;
т – стосується твердої пробки перероблюваного полімеру;
ц – стосується циліндра;
ч – стосується черв'яка.

Основні скорочення:

НВП – науково-виробниче підприємство (при назві установи);
НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут»;
ПАТ – публічне акціонерне товариство (при назві установи).

1. ОСОБЛИВОСТІ ПРИГОТУВАННЯ І ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1. Характеристика наповнювачів композиційних матеріалів на основі полімерів

Останнім часом широкого розповсюдження набули наповнені полімери – гетерогенні композиційні матеріали (КМ), що мають безперервну полімерну матрицю, у якій хаотично або впорядковано розташовані тверді, рідкі чи газоподібні наповнювачі [22, 33, 35, 61, 75–78, 88–90]. Такі наповнювачі зменшують витрату полімерів, а також модифікують композицію, надаючи їй властивостей, зумовлених призначенням, особливостями технологічного процесу та умовами експлуатації виробів. Докладний аналіз композиційних матеріалів та їхніх наповнювачів наведено в працях [12, 23].

Зупинимося докладніше лише на деяких питаннях застосування наповнювачів полімерних матеріалів – одних з основних компонентів КМ, що визначають їхні технологічні та експлуатаційні властивості.

За типом полімерної матриці розрізняють наповнені реактопласти, термопласти й каучуки [56]. За типом наповнювача наповнені полімери поділяють на дисперснонаповнені матеріали (наповнювач – дисперсні частинки різної форми, наприклад, подрібнене волокно), армовані матеріали (містять зміцнювальний наповнювач безперервної волокнистої структури), газонаповнені пластмаси і маслонаповнені каучуки.

Найширшого розповсюдження в промисловості й побуті набули дисперснонаповнені термопласти. Це пояснюється достатньо відпрацьованим механізмом приготування таких композицій і формування з них виробів, а також їх меншим, порівняно з наповненими реактопластами і каучуками, шкідливим впливом на людину та довкілля.

Під час одержання наповнених полімерів з визначеними властивостями велику роль відіграють характеристики дисперсних наповнювачів: форма, розміри й розподіл за розмірами частинок, природа поверхні та матеріал частинок [12, 23]. Так, наприклад, для підвищення тепло- та електропровідності полімерних матеріалів використовують металеві порошки, дисперсні волокна та графіт, а з метою надання полімерам магнітних властивостей – порошки феромагнетиків. Зміцнення полімерів досягається введенням до їхнього складу дрібнодисперсних наповнювачів з великою поверхневою активністю частинок, зокрема технічного вуглецю та колоїдного діоксиду кремнію. Абразивні композиційні матеріали одержують, вводячи до складу полімеру оксиди, карбіді й нітриди деяких хімічних елементів.

Значно менші вимоги висуваються до наповнювачів, коли наповнені полімери одержуються з метою зменшення вмісту матеріалу матриці, тобто самого полімеру. У цьому разі зменшуються витрати на приготування наповню-

вача (подрібнювання, сортування, сушіння, термообробка тощо) і відкриваються великі можливості утилізації твердих відходів найрізноманітніших галузей промисловості [28, 30]. Подібні наповнені полімери використовуються здебільшого не як конструкційні, а як декоративні та опоряджувальні – у будівництві, автомобіле-, вагоно- та літакобудуванні, для виготовлення тари та упаковки тощо.

За геометрією наповнювачі поділяють на нуль-, одно- і двовимірні. Нульвимірні наповнювачі мають розміри частинок армувального компонента, що набагато менші від розмірів елементарного об'єму КМ. До них належать сажа, порошки різних речовин – гідроксиду алюмінію, карбонату кальцію, діоксиду кремнію, силікатів та ін. Найбільш дешевий порошкоподібний наповнювач – карбонат кальцію (крейда). Разом з економічною доцільністю його застосування як наповнювача він поліпшує стабільність розмірів і підвищує вогнестійкість КМ. Карбонат кальцію може застосовуватися з обробленою поверхнею, а також у суміші з іншими наповнювачами.

Хімічну стійкість і високі діелектричні властивості додає полімерній матриці глиноземний наповнювач (наприклад, очищений або кальцинований каолін). Кремнеземні наповнювачі (пісок, кварц, перліт та ін.) застосовуються для наповнення широкого класу полімерних матеріалів з метою поліпшення волого- і термостійкості, формостійкості й герметичності виробу, а також деяких фізико-механічних властивостей.

Одновимірні армувальні компоненти мають один із розмірів, що майже дорівнює елементарному об'єму КМ. До них належать передусім волокна, які виготовляють у різноманітному асортименті: від волокон рослинного походження (сизаль, джут та інші) до високоміцних нитковидних монокристалів. Характерні для цих матеріалів значення міцності, твердості й температури плавлення зазвичай перевищують відповідні характеристики інших наповнювачів. Діаметр ниткоподібних кристалів здебільшого складає 1–30 мкм, при цьому відношення довжини до діаметра становить 500–5000. Односпрямовані КМ на основі ниткоподібних монокристалів у епоксидній матриці мають міцність до 1,4 ГПа, а модуль пружності до 200 ГПа. Волокнисті високоміцні високомодульні наповнювачі забезпечують підвищення міцності та пружних властивостей КМ, у тому числі і під час циклічних навантажень, підвищення термічної й хімічної стійкості, зміни електрофізичних характеристик і т.д. Міцнісні та інші характеристики КМ визначаються властивостями волокон, матриці і межі їх розділу, що обумовлює погоджене поведіння компонентів під час навантаження КМ.

Двовимірні армувальні компоненти мають два розміри, що приблизно дорівнюють елементарному об'єму КМ. До двовимірних наповнювачів належать лускаті, стрічкові і ткані матеріали, у тому числі плівки й металева фольга. Найбільш високоякісні сорти слюди характеризуються високим відношен-

ням середнього діаметра до товщини, що досягає ста й більше. У цьому разі її введення в полімерні матриці приводить до зростання пружно-міцнісних характеристик. КМ, наповнений частками слюди, за своїми характеристиками не поступається склопластику з рубаними волокнами. Порівняння властивостей полімерних КМ на основі скляних лускатих і волокнистих наповнювачів показує, що скловолокна забезпечують велику міцність, а скляні лусочки – велику твердість КМ. Якщо в КМ є декілька компонентів різної розмірності та природи, то їх запропоновано називати поліармованими.

За розташуванням компонентів КМ класифікуються на матеріали з одновісним місцезнаходженням, коли армувальний компонент розташований в матриці паралельними ланцюгами, з двовісним (площинним), коли армувальні компоненти розташовані в матриці паралельно один одному, а також з трьохвісним, коли неможливо виділити один чи два чітко визначених напрямки розташування наповнювача в матеріалі.

Компоненти КМ можуть належати до таких груп матеріалів:

- металів та їхніх сполук;
- неорганічних і полімерних сполук.

Із металів та їхніх сполук найбільше застосування знаходять такі наповнювачі.

Оксид алюмінію, який використовують більше як дисперсний наповнювач епоксидних смол для надання КМ підвищених електричних характеристик, теплопровідності, хімічної стійкості, твердості та зносостійкості, а також зниженого термічного коефіцієнта розширення.

Оксид берилію вводять у полімерні композиції для підвищення теплопровідності за малих змін електричних показників.

Оксиди заліза використовують у полімерних композиціях к невеликій кількості як пігменти червоного (оксид заліза), оранжевого (гідроксид заліза) або чорного (оксид заліза (II, III)). Суміші цих пігментів надають змогу одержувати композиції коричневого кольору та проміжних кольорів – від червоного до чорного. Використання оксиду заліза як наповнювача полімерних композицій підвищує їхню термостійкість. Гама-модифікація оксиду заліза вводиться в термопластичні полімери (наприклад, поліпропілен) для підвищення їхньої густини, твердості та жорсткості. Оксиди заліза (II, III) знаходять застосування у виробництві магнітних топографічних фарб і магнітних стрічок в електронній промисловості.

Оксид свинцю вводиться до складу полімерних композицій для підвищення їхньої густини та екранувальної здатності від жорстких випромінювань, що дозволяє використовувати такі композиції, наприклад, у виробництві екранів рентгенівських установок.

Оксид магнію при наповненні ним термопластичних полімерів приводить до підвищення жорсткості, твердості та опору повзучості. Твердий про-

жарений оксид магнію використовують для підвищення тепловіддачі полімерними композиціями. Оксид магнію знаходить широке застосування як згущувача поліефірних зв'язуючих.

Оксид цинку використовується як наповнювач і каталізатор в гумових сумішах та пластмасах. Так, поліпропілен, наповнений оксидом цинку, має підвищену атмосферостійкість. Його використання в композиціях на основі ненасичених поліефірів, поліоліефінів, силоксанових каучуків та інших підвищує їхню твердість, теплостійкість та електропровідність.

Введення діоксиду цирконію в термопластичні полімери на кшталт поліпропілену сприяє отриманню високомодульних і твердих КМ.

Сульфат барію використовують як наповнювач та білий пігмент для полімерних композицій, який надає їм високої густини, підвищеного опору стиранню, хімічної стійкості, високої екранувальної здатності для ультрафіолетових променів.

Дисульфід молібдену як наповнювач полімерних матеріалів забезпечує високу термостійкість, електричну міцність, модуль пружності та міцність під час розтягування та згинання. Крім того, його введення в композиції поліпшує технологічні властивості. Дисульфід молібдену застосовується здебільшого як внутрішнє мастило, яке знижує коефіцієнт тертя та підвищує зносостійкість наповнених матеріалів.

Порошкоподібні метали стали доступними для широкого використання при отриманні наповнених полімерів завдяки інтенсивному розвитку порошкової металургії у виробництві високоякісних сталей, заліза, міді та мідних сплавів. Для отримання наповнених полімерів спеціального призначення також застосовують порошки алюмінію, цинку, срібла, нікелю та свинцю. Унікальна поглинальна здатність гама, бета та нейтронного випромінювання деяких типів металів відкриває широкі можливості їх застосування як наповнювачів полімерних матеріалів, необхідних як у будівництві атомних електростанцій, так і для індивідуального захисту людей.

Із порошкоподібних знаходять застосування такі.

Порошки пористого та електролітичного заліза та спеціальні види порошків, як, наприклад, сталевий порошок з підвищеним вмістом заліза, суміші порошків залізо – вуглець, залізо – мідь – вуглець, порошки нікелевих, корозійностійких, нікельмолібденових сталей. Порошки електролітичного заліза й порошки, одержані в результаті розкладання карбонілу заліза, використовують у виробництві магнітних стрічок, спеціального чорнила та фармацевтичних продуктів, де їхня висока вартість швидко окупається. Подрібнена окалина, що є другим важливим джерелом оксиду заліза, також може використовуватись для отримання порошкоподібних наповнювачів. Їх одержують розпиленням високовуглецевої сталі, попередньо розплавленої у вагранці, з наступною декарбонізацією або розпиленням розплаву низьковуглецевої сталі за до-

помогою водяного струменя, що подається під великим тиском.

Більшість металів і керамік, що мають магнітні властивості, можуть бути використані для одержання полімерних магнітів диспергуванням їхніх порошків в полімерній матриці. Натепер для одержання полімерних композиційних матеріалів, що мають магнітні властивості, найчастіше використовують еластичні полімери, властивості яких дозволяють вирішувати багато технічних задач. Для одержання полімерних матеріалів з оптимальними магнітними характеристиками розроблені спеціальні методи орієнтації твердих магнітних частинок пластинчастої форми.

Найбільш часто як магнітні наповнювачі для полімерів застосовують керамічні магнітні порошкові матеріали, що називаються феритами. Низька вартість феритів обумовлює їхнє широке застосування передусім в автомобільній промисловості та приладобудуванні. Вміст феритних порошків у полімерних магнітах досягає 88–92 % (за масою). Полімерні магніти не проводять електричний струм, мають низьку густину, легко формуються в деталі складної форми й легкодоступні.

З неметалевих наповнювачів найбільш поширеними є технічний вуглець, бавовна, целюлозні волокна, джут, конопля, крохмаль, тирса та ін.

За формою неметалеві наповнювачі поділяють на такі групи.

Сферичні наповнювачі (мікросфери) суцільні й порожнисті. До основних переваг мікросфер, що визначають ефективність їх застосування, належать такі:

- мінімально можливе відношення площі поверхні до об'єму, що за інших рівних умов сприяє малій адсорбції сполучного й дозволяє вводити в матрицю велику кількість мікросфер, у тому числі за умови наповнення до 25 %, без зміни в'язкості матриці;

- низька густина (80–640 кг/м³);

- досконалість форми, що сприяє кращому змочуванню, рівномірному розподілу в КМ і можливості точного відтворення властивостей;

- низькі абразивні характеристики, що особливо важливо під час лиття виробів;

- високі термостійкість, механічна міцність та інертність, у тому числі хімічна, стосовно різних типів матриць;

- зниження усадки, поліпшення стабільності розмірів виробів і зменшення вологопоглинання;

- порівняно низька вартість.

Лускаті наповнювачі, до яких належать слюда, луски діоксиду алюмінію, скляні луски, кристали дібориду алюмінію, сталкві луски та пластини, лускатий карбід кремнію тощо. Спеціальні види лускатих наповнювачів дозволяють забезпечувати дуже високі пружно-міцнісні характеристики КМ.

Стрічкові наповнювачі (скляна, графітова, борна стрічки) можуть стати

достатньо ефективними для локального зміцнення волокнистих КМ у місцях з високою концентрацією механічних напружень.

Короткострічкові наповнювачі (силікат кальцію, короткі мікротонкі волокна, ниткоподібні монокристали, азбест), найважливішим з яких є азбест. Він виробляється у вигляді волокнистого порошку з різною довжиною волокон, а також у вигляді паперу, пряжі, тканин і повсті. Як неорганічний мінерал, азбест інертний до атмосферних впливів, а також до більшості хімічних реагентів, крім кислот. Азбест використовується в пластмасах як зміцнювальний наповнювач, додаючи виробам підвищеної міцності та збільшуючи модуль пружності під час вигину, поліпшуючи їхній опір повзучості й теплостійкість, знижуючи термічний коефіцієнт розширення, в також дозволяє регулювати текучість композиції та знижувати вартість матеріалу. Недоліком азбесту є знижені значення ударної в'язкості полімерних композицій. Також існують деякі труднощі перероблення матеріалів з його використанням, темний колір одержуваних пластмас і необхідність додаткової стабілізації ряду полімерів, наповнюваних азбестом.

Неперервні волокнисті наповнювачі, до яких належать: скляні, базальтові та високомодульні органічні волокна (нитки та джгути, тканини, препреги, неткані матеріали, фетр, повсть, гібридні наповнювачі, рублені волокна). Композиційні матеріали на основі високомодульних і високоміцних органічних (арамідних) волокон характеризується меншою густиною, підвищеними модулями пружності під час стискання й вигину, а також модулем пружності й міцності під час розтягування, більш високими електро- та теплоізоляційними показниками й більш високою здатністю демпфувати механічну і звукову вібрацію порівняно зі склопластиками. Незважаючи на високу твердість арамідних волокон, з них можуть бути отримані майже всі типи волокнистих армувальних наповнювачів – нитки, ровінги, тканини різного плетива, неткані матеріали, повсть, папір тощо. Для органополімерів на основі таких наповнювачів характерні низька повзучість, висока стійкість до ударних навантажень, низька чутливість до надрізів і дуже високі показники тривалої міцності.

Наповнювачі-антипірени (оксид сурми, гідратований оксид алюмінію, аміакати, борати, органічні з'єднання, які містять галогени, карбонати та бікарбонати, сульфати, з'єднання молібдену, органічні з'єднання та ін.) вводяться для підвищення термостійкості полімерів.

Великий асортимент наповнювачів дозволяє створювати КМ із широким спектром властивостей. Деякі наповнювачі значно зменшують собівартість КМ, приводячи до зниження густини й поліпшення перероблення, істотно збільшують пружно-міцнісні характеристики, у тому числі циклічну міцність і віброміцність, поліпшують надійність, підвищують термічну й хімічну стійкість та інші показники. Властивості виробів із КМ значною мірою залежать від методів приготування композиції, якості змішування й формування.

Для поліпшення умов перероблення й формування, надання виробам привабливого зовнішнього вигляду й поліпшення певних властивостей у полімери вводяться різноманітні добавки в малих концентраціях (до 5 %). Такі добавки вводяться або безпосередньо на стадії синтезу підприємствами–виробниками полімерів, або на підприємствах з перероблення полімерів. Очевидно, що для одержання виробів із композиційних матеріалів необхідна розробка спеціального обладнання, що враховує властивості як основного полімеру, так і наповнювачів.

1.2. Методи перероблення композиційних матеріалів

Якщо використовуються дисперсні наповнювачі, то основним способом виробництва наповнених полімерів є механічне змішування наповнювача з розплавом (рідше – з розчином полімеру, форполімеру, олігомеру або мономеру) та подальше формування одержаної композиції у виріб. При цьому етап приготування суміші «полімер – наповнювач» є визначальним і за своєю складністю вирізняється з усіх інших етапів виготовлення виробів із полімерних композиційних матеріалів (ПКМ): підготування й дозування компонентів, формування, термообробки (передусім охолодження), різання, оздоблювання тощо [7, 33].

Змішування – це технологічний процес, який полягає у введенні до складу полімеру ряду добавок з метою цілеспрямованого змінювання його властивостей [56, 62, 64]. Оскільки всі характеристики композиційного матеріалу визначаються його складом, ізотропність властивостей досягається тільки за високого ступеня однорідності розподілу компонентів в об'ємі полімеру. Виходячи з цього, змішування можна визначити як процес, метою якого є досягнення такого розподілу компонентів у суміші, який би забезпечив однорідність фізичних і хімічних властивостей у будь-якій точці системи. Існуючу різноманітність процесів змішування можна класифікувати за двома ознаками: характером процесу й фазовим станом робочого середовища.

За характером процесу розрізняють періодичне й безперервне змішування. У разі періодичного змішування всі компоненти одночасно або в певній послідовності вводяться до обмеженого об'єму полімеру, на який багаторазово діють робочі органи змішувального обладнання. За цим принципом працюють барабанні, лопатеві, вихрові, роторні змішувачі та вальці періодичної дії. У разі безперервного змішування певна кількість суміші одноразово проходить крізь робочу порожнину змішувача. За цим принципом працюють одно-, дво- та багаточерв'ячні змішувачі, дискові, черв'ячно-дискові, дисково-черв'ячні, черв'ячно-дисково-черв'ячні, дисково-камерні змішувачі (екструдери) і вальці безперервної дії.

За фазовим станом робочого середовища розрізняють:

– змішування в рідкій фазі, яке відбувається внаслідок спільної дії процесів молекулярної дифузії та механічного перемішування; цей вид змішування є характерним у разі одержання ПКМ із розчинів полімерів;

– змішування сипких речовин, яке відбувається внаслідок механічної дії на систему; цей вид змішування використовується для приготування сухих композицій на основі порошкоподібного полівінілхлориду та для змішування гранульованих полімерів;

– змішування компонентів суміші в умовах в'язкотекучого стану полімеру, яке здійснюється під дією зовнішніх сил, тому що процеси дифузії внаслідок високої в'язкості суміші (зазвичай більше за 50 Па·с) відбуваються дуже повільно.

У промисловості одержання й перероблення ПКМ найширшого розповсюдження набули два останніх способи (передусім змішування в умовах в'язкотекучого стану полімеру).

Розглянемо конструкції найбільш розповсюджених сучасних змішувачів і шляхи їх удосконалення.

Лопатеві змішувачі використовуються для приготування ПКМ, які застосовуються для формування окремих заготовок, напівфабрикатів і деталей скінченних розмірів. Різноманітні машини такого типу випускаються фірмою Werner und Pfleiderer (Німеччина). Окрім добре відомих однолопатевиx змішувачів з Z-подібним робочим валом, широкого застосування нaтепер набули так звані симплекс-змішувачі – одновальні машини з термостатованим корпусом і змішувальним органом, стрічкові елементи якого утворюють шнекову навивку. Також застосовуються універсальні двовальні змішувачі-пластикатори із Z-подібними робочими лопатями, які розвантажуються перекиданням корпуса та споряджені пристроєм вакуумної дегазації, що приєднується до герметичної кришки змішувача.

У лопатевих змішувачах-пластикаторах зі шнековим вивантаженням готової композиції трудомістку операцію вивантаження суміші механізовано завдяки нетрадиційній формі робочої камери, виконаної у вигляді двох півциліндрів, у спільних донних щелепах яких розташовано вивантажувальний шнек, який в деяких випадках може бути використано і як формувальний.

Щоб підвищити якість змішування, застосовуються диспергувальні лопатеві змішувачі-пластикатори, у яких використовуються не стаціонарні, а підірні кришки, споряджені змінними поршневиx змішувальними елементами – пуансонами фасонної конструкції з механічним або гідравлічним рухом.

При змішуванні двох чи більше полімерів або полімеру з наповнювачем необхідно забезпечити високий ступінь диспергування одного компонента в іншому. Внаслідок високої в'язкості полімерів у розплавленому (в'язкотекучому) стані високий ступінь диспергування можна забезпечити лише використовуючи змішувальне обладнання спеціальної конструкції. На

зміну звичайним екструдерам, розробленим у 1970-х роках, прийшли більш досконалі машини. У першу чергу це екструдери з динамічними та статичними змішувачами та різноманітні комбіновані (зокрема каскадні) машини [7].

Статичні змішувачі – це пристрої без рухомих робочих органів, які заповнюються перероблюваною композицією під тиском робочого органу (зазвичай черв'яка) екструдера. Їх встановлюють між робочим органом та екструзійною головкою. Конструктивні особливості статичних змішувачів дають змогу так змінювати поля швидкостей і напрям ліній току, що площа поверхні поділу істотно збільшується, і композиція весь час проходить крізь кожний з повторюваних елементів змішувача. Поверхню поділу між змішуваними компонентами можна розвинути двома способами: за рахунок зсувної течії та розщеплюванням та перестроюванням потоків композиції. В обох випадках необхідним є створення перепаду тиску, який визначає кількість змішувальних елементів, а отже і якість змішування.

Ряд чинників стримує широке промислове впровадження статичних змішувачів. По-перше, їх застосування робить необхідним створення додаткового (іноді значного) перепаду тиску, і, по-друге, інтенсивні зсувні деформації та створення складнапруженого стану в потоці може призвести до термомеханічної деструкції полімеру й наповнювача. Якщо для поліолефінів, полістиролу та деяких інших термопластів це не так важливо, то для полівінілхлориду, поліамідів і деяких інших полімерів, схильних до деструкції, це може виявитися дуже суттєвим, спричинити потребу в проведенні додаткових досліджень і виключає можливість застосування однакового обладнання для різних композицій.

Каскадні (двостадійні) екструдери – це два встановлені послідовно екструдери, у яких під час поздовжнього руху композиції перший екструдер виконує операції завантаження (подавання) і пластикації полімеру, а другий – змішування (гомогенізації) і нагнітання маси в формувальний пристрій – головку.

Кожен елемент каскаду є простішим за конструкцією, ніж «повномірний» одночерв'ячний екструдер, але разом вони виконують усі операції. Такі машини дорожчі, ніж класичні одночерв'ячні, але мають кілька переваг. По-перше, розмежування операцій дозволяє автономно та більш точно корегувати технологічні режими й порівняно просто досягати оптимальних умов на окремих стадіях, забезпечуючи високу якість екструдату за умови максимальної продуктивності. По-друге, поділ екструдера «на дві частини» дозволяє ефективно організовувати на проміжній ділянці їх поєднання, видалення летких речовин (дегазацію полімеру), що суттєво поліпшує якість одержуваних напівфабрикатів і виробів (зводиться до мінімуму можливість появи у виробках бульбашок, раковин, каверн та інших дефектів). Нерідко друга машина каскаду працює практично в адіабатичному режимі і потребує зовнішнього обігріву

тільки під час пуску екструдера, що також деякою мірою спрощує обслуговування агрегату в цілому.

Технологія багатостадійної екструзії використовується фірмами Battenfeld, Barmag (ФРН), Buss (Швейцарія), Mitsubishi Petrochemical (Японія), Egan, John Brown (Велика Британія), Sterling Extruder Corp., Davis-Standard (США) та іншими [7]. При цьому фірма Egan виготовляє каскадні екструдери з використанням черв'яка другої вітки каскаду дуже великої $((40-48)D)$ довжини і подачею мінерального наповнювача практично вздовж усього черв'яка. Щоб зменшити абразивне зношення обладнання, наповнювач спочатку просочується розплавом.

Поряд з традиційним горизонтальним розташуванням екструдерів каскаду використовуються вертикальні й вертикально-горизонтальні схеми (наприклад, фірмою Reotec (Франція)), що покращує умови перероблення матеріалів, схильних до термомеханічної деструкції [7].

У 1980–90-х роках тенденція створення принципово нових конструктивних рішень поступилася місцем вдосконаленню конструкцій черв'яків, матеріальних циліндрів, а також систем автоматичного контролю і регулювання. При цьому підвищення якості змішування досягається заміною звичайних черв'яків з трьома конструктивно-технологічними зонами (завантаження – живлення, плавлення – пластикація та нагнітання – дозування) черв'яками з чотирма основними зонами: живлення, стискання та зсуву, змішування, дозування.

Одночерв'ячні екструзійні змішувачі за якістю змішування майже не поступаються двочерв'ячним машинам [1, 2, 13, 14, 19, 27, 31, 36, 37, 58, 59, 60, 63, 69, 71, 73]. У дрібно- й середньотоннажних виробництвах ПКМ таким машинам надають перевагу порівняно зі складнішими двочерв'ячними екструдерами. Одночерв'ячні машини вирізняються відносно невеликими витратами на виготовлення, порівняно простими обслуговуванням і ремонтом. Значне відносне подовження черв'яка з $(18-25)D$ у 1970-і роки до $(24-35)D$ тепер пов'язане не з подовженням їх нарізної частини, а з введенням до конструкції таких черв'яків спеціальних змішувальних пристроїв.

Особливе місце займають змішувачі типу Transfermix, у яких черв'як і матеріальний циліндр мають конічні й циліндричні ділянки зі змінною глибиною нарізки за сталого поперечного перерізу міжвиткових каналів. Така конструкція забезпечує високу якість змішування, але є достатньо складною у виготовленні та експлуатації.

На початку 1980-х років розроблено екструдери з черв'яком і циліндром нетрадиційної форми: у зоні пластикації черв'як має чотирикутний поперечний переріз, а матеріальний циліндр – шестикутний. Цим досягається високий змішувальний ефект за умови низької температури перероблення. Такі машини отримали назву НМ-екструдерів (від англ. High Mix) [7].

Незважаючи на чи не найскладнішу конструкцію й високу вартість, дво- й багаточерв'ячні екструдери залишаються основним обладнанням для високопродуктивних ліній одержання наповнених композицій. Вже зараз продуктивність двочерв'ячних екструдерів може перевищувати 8,9 кг/с (32 т/год) [7].

Розрізняють екструдери, що мають черв'яки із взаємним зачепленням і без нього, черв'яки, що обертаються в одному чи в протилежних напрямках.

Екструдери з черв'яками без взаємного зачеплення простіші у виготовленні та експлуатації, проте збільшений час перебування в них перероблюваної композиції підвищує ймовірність її термодеструкції. Машини з черв'яками із взаємним зачепленням майже позбавлені цього недоліку, крім того вони дозволяють розвивати високий тиск на порівняно короткій ділянці, що є неабиякою перевагою під час перероблення ПКМ, а у разі заміни перероблюваного матеріалу потребують відносно невеликого часу очищення порівняно з екструдерами, які обладнано черв'яками із взаємним зачепленням.

Обертання черв'яків в одному напрямку дозволяє підвищити частоту їх обертання, не наражаючись на небезпеку заклинювання, і, відповідно, збільшувати продуктивність за умови забезпечення якісного змішування компонентів суміші. Екструдери зі черв'яками із взаємним зачепленням, що обертаються у протилежних напрямках, забезпечують високий змішувальний ефект за значної продуктивності. Однак необхідно зауважити, що радіальні (розпірні) зусилля, які виникають у двочерв'ячних екструдерах, призводять до підвищеного зношення робочих органів (передусім матеріального циліндра).

Багато двочерв'ячних екструдерів провідних фірм обладнано набірними черв'яками. Так, черв'яки часто набираються з окремих втулок, що утворюють так звані місильні елементи-кулачки з криволінійною поверхнею (найчастіше – у формі опуклого трикутника або еліпса, що збільшує об'єм міжвиткового простору), які встановлюються на робочих валах з кутовим зміщенням один відносно другого. Часто двочерв'ячні екструдери споряджаються спеціальними зонами дегазації, які дозволяють відводити пару і газу, що виділяються під час перероблення композиції (наприклад, коли використовуються органічні наповнювачі). Однак це негативно впливає на якість одержуваного матеріалу і, як наслідок, – на якість виробів.

Дwochерв'ячні машини без особливих затрат дозволяють отримувати безперервні (погонні) вироби й листи з ПКМ безпосередньо, тобто уникнувши стадії грануляції, що дозволяє знизити вартість виробів на 30–50 % порівняно з двостадійною технологією (одержання гранул ПКМ та їх перероблення на вироби на окремій екструзійній лінії). Однак одним із істотних недоліків таких машин є ускладнене плавлення ПКМ.

Японською фірмою Ishinaka Iron Works Co Ltd розроблено універсальний тричерв'ячний змішувач (один центральний і два бокових черв'яки), призначений для перероблення полімерів з наповненням їх карбонатом кальцію,

тальком, скловолокном, металевими порошками, деревною мукою тощо. Однак цей високоефективний екструдер, на жаль, вирізняє значна вартість [7].

Суттєвим досягненням в області багаточерв'ячних машин є розробка планетарно-валкових машин, які забезпечують продуктивність від 0,08 до 0,97 кг/с (300...3500 кг/год) [7].

До безчерв'ячних екструдерів належать передусім дискові, валкові й дисково-камерні («дископак») екструдери. Принцип дії дискових екструдерів полягає у використанні ефекту нормальних напружень (ефекту Вайссенберга), які виникають у полімері, що перебуває між двома дисками, один з яких обертається. Поряд зі своїми безумовними перевагами: високою диспергувальною й гомогенізувальною здатностями, простотою конструкції й компактністю, вони мають і «хронічні» недоліки: низький тиск і невелику продуктивність порівняно з черв'ячними екструдерами. Щоб позбутися цих недоліків, запропоновано дисково-черв'ячні й черв'ячно-дискові екструдери (рідше черв'ячно-дискові-черв'ячні).

На відміну від дискових екструдерів, робота яких забезпечується за рахунок нормальних напружень, що виникають у полімері внаслідок руху рухомого диску відносно нерухомого, у розроблених останнім часом екструдерах «дископак» у спільному корпусі-камері розташовано два обертових диски. Такі машини, подібно до черв'ячних екструдерів, мають зони плавлення, змішування, дегазації й нагнітання, щоб продавлювати матеріал крізь формувальний пристрій певної форми й розмірів. Цей тип машин особливо ефективний для перероблення порошкоподібних полімерів [7].

Лінії з виробництва безперервних і листових виробів з ПКМ можна поділити на три групи: каландрові, екструзійні й комбіновані.

Каландрові лінії застосовуються для одержання листових виробів і вирізняються великою продуктивністю (до 10 млн м²/рік і більше), однак необхідність спеціального змішувального та змішувально-підігрівального обладнання (роторних змішувачів і вальців) значно ускладнює та здорожує лінію [29]. Тому лінії на базі каландрів використовуються винятково у великотоннажних виробництвах.

Екструзійні лінії хоча і мають меншу продуктивність, мають безперечні переваги: суміщенням багатьох функцій в одній машині (плавлення полімеру, змішування, дегазація, формування суміші), можливістю швидкого переходу на випуск виробу іншої форми і розмірів (заміною формувального пристрою), універсальністю (одержанням як профільних безперервних, так і листових матеріалів).

У зв'язку з цим переваги ліній на базі екструдерів беззаперечні й завдання полягає передусім у правильному виборі базової машини чи агрегату, визначення послідовності подавання компонентів підготовлюваної суміші, а також агрегатного стану полімеру під час введення до його складу наповнювача.

Аналіз сучасних конструкторських рішень у технології формування полімерних виробів на основі суміші полімерів з різними наповнювачами дозволив виділити такі варіанти реалізації процесу.

1. *Каскадна екструзійна установка на основі дискового розплавлювача та двочерв'ячного змішувача* (рис. 1.1,а). У цьому варіанті процесу гранули полімеру надходять (або дозуються у випадку «голодного» живлення) в розплавлювач. До двочерв'ячного екструдера надходить розплав полімеру, а наповнювач дозується у вигляді порошку. Є можливим масове чи об'ємне дозування останнього. Розплав полімеру під тиском, що розвивається першим екструдером каскаду, надходить в об'єм наповнювача, омиваючи частинки останнього, та ефективно розподіляється в міжвитковому просторі другого екструдера, що сприяє одержанню високогомогенізованої суміші ПКМ. Основні переваги: інтенсивне розплавлення полімеру та якісне змішування в двочерв'ячному змішувачі. Недолік – ускладнена конструкція екструзійної

2. *Каскадна екструзійна установка на основі дискового розплавлювача-змішувача та одночерв'ячної машини* (рис. 1.1,б). У цьому випадку гранули полімеру та наповнювач у вигляді порошку одночасно дозуються в дисковий розплавлювач, потім розплав з наповнювачем надходить до одночерв'ячного екструдера, остаточно гомогенізується та екструдується крізь формувальний пристрій. Основні переваги установки: висока якість змішування в дисковому екструдері, спрощена конструкція другого ступеня екструзійної установки (замість двочерв'ячної машини встановлено одночерв'ячну). Недолік – зменшення інтенсивності плавлення полімеру в присутності порошкоподібного наповнювача. У цьому разі необхідно передбачити попереднє змішування полімеру з наповнювачем (наприклад, у «п'яній» бочці [28]).

3. *Екструзійна установка на основі одного двочерв'ячного екструдера*. У цьому разі можливі два варіанти організації процесу:

а) заздалегідь змішані гранули полімеру й порошкоподібний наповнювач дозуються на вхідній ділянці екструдера (рис. 1.2,а). Під час проходження суміші вздовж осі екструдера відбувається розплавлення полімеру, його змішування з наповнювачем, гомогенізація та екструдування крізь формувальний пристрій. Основні переваги установки: висока якість змішування (гомогенізації), простота конструкції (один екструдер), проста схема керування процесом, можливість використання порошкоподібного полімеру. Недоліки: достатньо складна конструкція основного агрегату (двочерв'ячного екструдера), відносно тривалий режим плавлення внаслідок одночасного подавання полімеру й наповнювача.

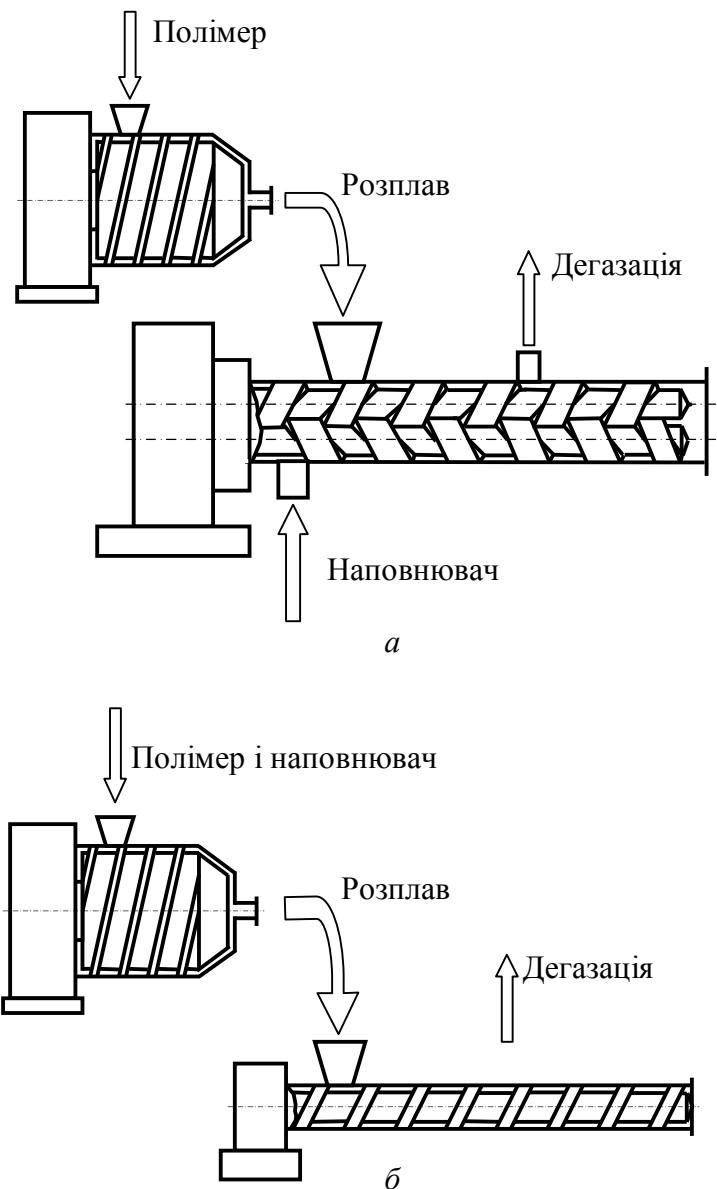


Рис. 1.1. Каскадні схеми з дисковим розплавлювачем

б) компоненти суміші (гранули й порошкоподібний наповнювач або порошкоподібні полімер і наповнювач) дозуються окремо (рис. 1.2,б). На вхідній ділянці екструдера дозується полімер, потім після його розплавлення (приблизно в центральній зоні екструдера) – наповнювач. Під час проходження суміші далі вздовж осі екструдера здійснюються гомогенізація суміші та її екструдювання крізь формувальний пристрій. Основні переваги установки: висока якість змішування (гомогенізації), можливість використання порошкоподібного полімеру, підвищена (порівняно з варіантом а) інтенсивність плавлення полімеру. Недоліки: достатньо складна конструкція основного агрегату, необхідність встановлення системи дозування порошкоподібного наповнювача.

4. *Каскадна екструзійна установка на основі черв'ячного розплавляюча-змішувача і черв'ячного змішувача (гомогенізатора)* (рис. 1.3,а). Гранули полімеру надходять (дозуються у разі «голодного» живлення) до першого екструдера-розплавляюча. Одержаний розплав надходить до другого екструдера, у який одночасно дозується порошкоподібний наповнювач. У цьому екструдері відбувається процес змішування (гомогенізації) та екструдуювання суміші крізь формувальний пристрій. Екструдер-змішувач обладнується спеціальними пристроями, що ініціюють змішування. Основні переваги: інтенсивне розплавлення полімеру в першому екструдері і достатньо якісне змішування. Недолік – ускладнена конструкція екструзійної установки.

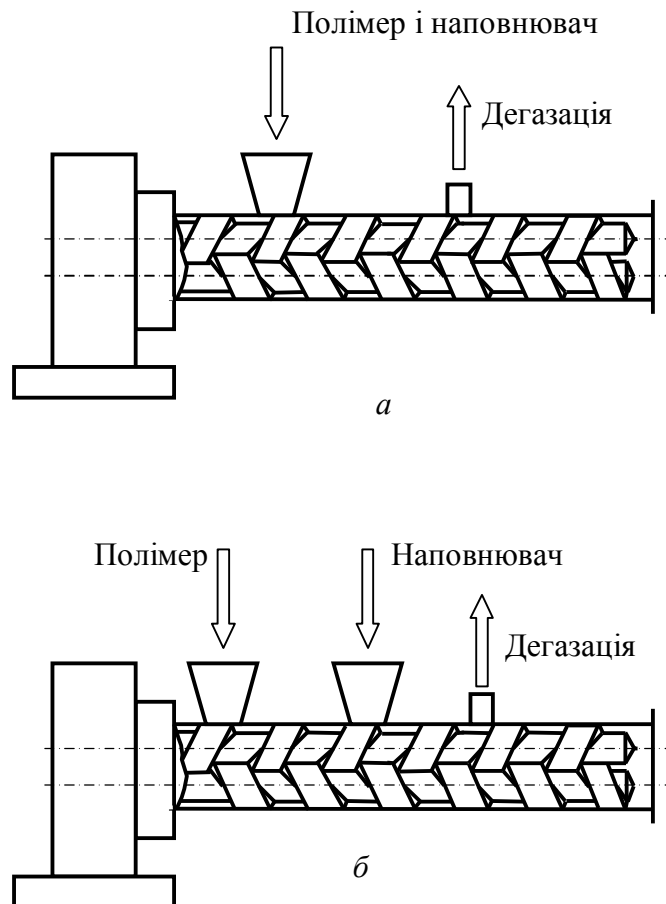


Рис. 1.2. Схеми на базі двочерв'ячних екструдерів

5. *Екструзійна установка на основі одночерв'ячного екструдера. Одночерв'ячний прес (одночерв'ячна екструзійна установка) має в цьому разі три функційні зони: плавлення, змішування й гомогенізації* (рис. 1.3,б). У першу зону подаються гранули полімеру, що після плавлення надходять до другої зони, на початку якої також дозується порошкоподібний наповнювач. У другій зоні за допомогою спеціальних пристроїв забезпечується якісне змішування та дегазація суміші. Потім підготовлена суміш надходить до третьої зони,

де остаточно гомогенізується та екструдується крізь формувальний пристрій. Основні переваги: спрощення конструкції екструзійної установки (порівняно з каскадом), забезпечення достатньо якісного змішування, спрощення процесу керування екструдкуванням.

Також є можливість безперервного пресування виробів у вигляді листа. Тоді екструзійна установка комплектується плоскощілинною головкою та дво- або тривалковим гладильним каландром.

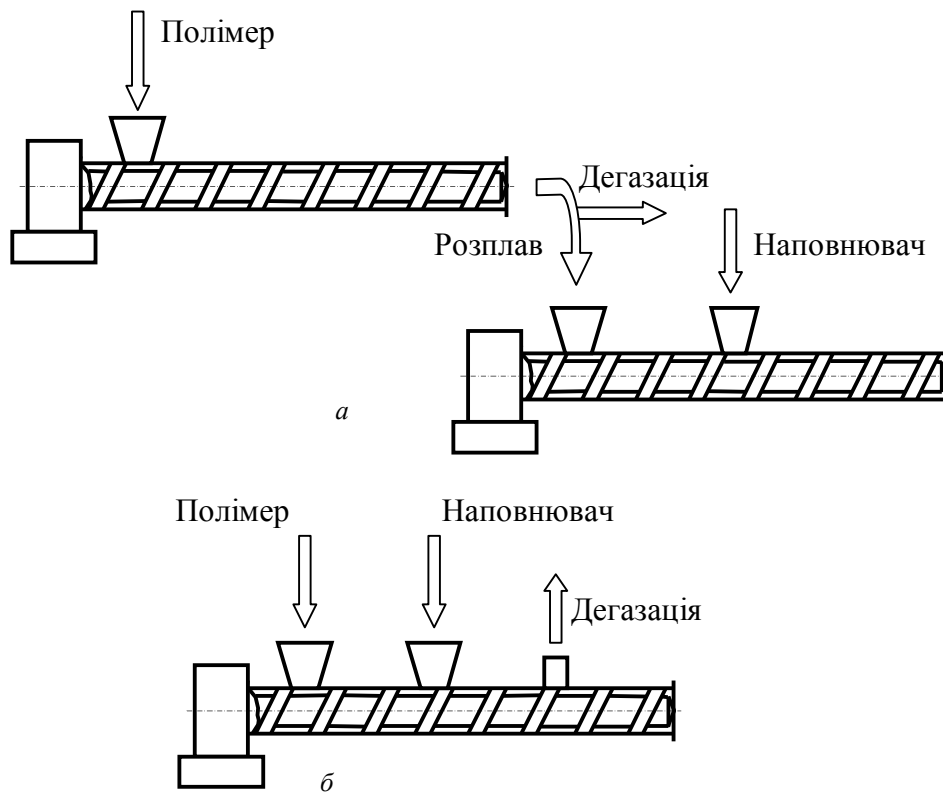


Рис. 1.3. Схеми на базі одночерв'ячних екструдерів

У кожному з варіантів, що розглянуто вище, необхідно організовувати дегазацію суміші. У разі одночасного живлення екструдерів сумішню гранул і порошку потрібно передбачити змочування суміші в змішувачі, щоб утримати порошок на гранулах. У схемах, де необхідним є дозування порошкоподібного наповнювача, потрібно передбачити встановлення дозаторів (наприклад, об'ємних).

Також потрібно зазначити, що моделювання та проектування каскадних установок має низку особливостей, сутність яких полягає в такому. За заданої продуктивності й фіксованих параметрах якості розплаву на виході установки в каскадній схемі існує декілька можливих варіантів конструктивного виконання окремих складових каскадної схеми, які в сукупності забезпечують досягнення цих параметрів. Так, наприклад, можна використовувати різні комбінації діаме-

трів черв'яків за відповідних значень частот їх обертання, змінювати відношення робочої довжини черв'яка до його діаметра (L/D) тощо. Тому при моделюванні необхідно додатково сформулювати умови стикування окремих складових схеми, наприклад, задаванням параметрів розплаву після кожного екструдера. Також слід зазначити, що продуктивність обох екструдерів визначається або продуктивністю дозатора, якщо він ж, або продуктивністю першого екструдера за відсутності дозатора. Тоді в першому випадку обидва екструдери працюють переважно в режимі «голодного» живлення з неповністю заповненими на певній довжині каналами робочих органів, а в другому випадку в такому режимі працює лише другий екструдер. Найбільш сприятливі умови з точки зору керування процесом забезпечують схеми в складі дозаторів і двох екструдерів, один з яких забезпечує плавлення, а інший – змішування й гомогенізацію розплаву, для чого його робочі органи споряджають відповідними змішувальними елементами. Як розплавлювач, перед яким не ставиться вимога забезпечення тиску, необхідного для продавлювання розплаву крізь формувальну головку, доцільним є використання дискового екструдера, який забезпечує плавлення практично в адіабатичному (автогенному) режимі за менших питомих енергетичних витратах і добре зарекомендував себе особливо в технологічних схемах гранулювання, а також перероблення відходів.

Переважає більшість полімерів і ПКМ мають досить низькі коефіцієнти теплопровідності та високу в'язкість розплаву, який є неньютонівською рідиною. Тому застосування дисипативного нагрівання, яке здійснюється в масі розплаву, порівняно із зовнішніми нагрівниками є більш доцільним, оскільки зменшує температурну неоднорідність розплаву й потребує менших енергетичних витрат уже хоча б тому, що при цьому знижується температура стінки циліндра і зменшуються втрати в навколишнє середовище. Дійсно, під час нагрівання з підведенням теплоти від зовнішніх нагрівників температура стінки циліндра має бути досить високою для забезпечення потрібного градієнта температур в розплаві з низькою теплопровідністю. З цієї точки зору дисковий розплавлювач має переваги порівняно з черв'ячним. Отже, в подальшому розглядатимемо каскадну схему в складі дозаторів, дискового розплавлювача та одночерв'ячного екструдера з черв'яком із змішувальними елементами.

Таким чином, враховуючи особливості каскадної схеми, під час конструювання екструзійного обладнання передусім поставимо задачу пошуку геометрії робочих органів екструдерів і частоти їх обертання, за яких для певної продуктивності установки забезпечуються задані параметри розплаву на виході певного екструдера каскадної схеми за мінімально необхідних для даного ПКМ питомих енергетичних витрат. Ця задача в першу чергу має розв'язуватися числовим моделюванням процесу підготовки розплаву.

2. ЗАГАЛЬНІ ЗАСАДИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСТРУДЕРІВ

Під час конструювання екструдерів одним з найважливіших моментів є вибір геометрії робочих органів, від якої залежить як продуктивність екструдера, так і якість підготовки одержуваного розплаву. В екструдері, живлення якого здійснюється твердим полімером, можна виділити три функційні зони: подачі, плавлення й гомогенізації, між якими існують перехідні області.

У літературі є багато теоретичних та експериментальних праць, у яких досліджуються окремі процеси, що відбуваються в різних зонах. Проте розрахунок кожної зони окремо не може дати достовірної інформації про весь процес екструзії в цілому, оскільки в такому разі не враховується взаємний вплив і взаємний зв'язок функційних зон. У зв'язку з цим виникає необхідність побудови математичної моделі процесу екструзії в цілому як послідовності моделей окремих процесів із врахуванням умов їх стикування й перехідних областей. Разом з тим слід зауважити, що одержувані теоретичні розв'язки математичних моделей описують певною мірою ідеалізовані умови проходження процесів, оскільки крайові умови та реологічні моделі, які беруть для розв'язання диференціальних рівнянь, достатньо приблизні відносно реальних процесів. Так, наприклад, порівнюючи розв'язки, що описують течію ньютонівської і ступеневої реологічних моделей рідини в каналі черв'яка, слід мати на увазі, що в реальному процесі за наявності нерозплавлених частинок зруйнованої полімерної пробки, розміри яких одного порядку з глибиною нарізки, реальний профіль швидкості достатньо точно не описується жодною із названих моделей. У ряді випадків використання складних моделей, у яких враховано низку уточнюючих чинників, з точки зору інженерних розрахунків є недоцільним, оскільки параметри, що містяться в рівняннях, не можуть бути визначені з достатньою точністю. Враховуючи викладене, можна вважати, що для інженерних розрахунків допустимим є використання відносно простих моделей окремих процесів, що враховують тільки найбільш суттєві чинники, які за виконання певних обмежень і використання методу ступеневої апроксимації достатньо адекватно описують процес. Більш складні моделі доцільно використовувати для задач з оцінки якості змішування, яка істотно залежить від швидкісних полів.

Сутність метода ступеневої апроксимації полягає в тому, що процес екструзії розглядається як сума послідовно розміщених достатньо малих елементів об'єму, в межах яких ряд параметрів вважаються постійними, а їх зміна відбувається стрибкоподібно на границях розділу елементів. Іншими словами, безперервна зміна функцій замінюється ступінчастою. При цьому потрібно зауважити, що згадані елементи виділяються в різних зонах (подачі, плавлення, гомогенізації), або в перехідних областях. Тому в подальшому

введемо поняття модуля, під яким будемо розуміти елемент об'єму, виділений в певній функційній зоні (області), у якому проходять процеси, що описуються системою рівнянь, яка відповідає цій функційній зоні (області). Так, наприклад, елемент, виділений в зоні гомогенізації, описується системою рівнянь, що відповідає процесу гомогенізації. При цьому вихідні параметри кожного попереднього модуля є почітковими (вхідними) параметрами наступного модуля. Для визначення місця переходу від одного до іншого різноіменних модулів необхідно додатково математично сформулювати умови стикування цих модулів [31].

Більшість моделей будується так, що геометрія робочих органів і частота їх обертання вважаються заданими, а шуканими величинами є проодуктивність, температура розплаву та енергетичні витрати. Такий розрахунок є по суті перевірочним. У той же час, наприклад, мінімально необхідні питомі енергетичні витрати можна досить просто оцінити за різницею ентальпій полімеру при температурі його на вході в робочі зони екструдера й на виході з них. Різниця між дійсними й мінімально необхідними питомими енергетичними витратами є показником досконалості конструкції екструдера, яка значною мірою залежить від геометрії каналів робочих органів. Тому для проектних розрахунків передусім доцільно проводити розрахунок геометрії каналів робочих органів, для чого необхідно сформулювати вимоги оптимальності, яким має відповідати ця геометрія в кожній функційній зоні (області). Це має особливо важливе значення під час проектування дискового розплавлявача. Сказане вище створює передумови для побудови математичних моделей підготовки розплаву двох типів:

- моделей пошуку геометрії робочих органів, яка відповідає сформульованим вимогам, а також частоти обертання, що для заданої продуктивності забезпечують потрібну якість розплаву на виході з екструдера;

- моделей пошуку частоти обертання, що за заданих продуктивності й геометрії робочих органів забезпечує потрібний параметр якості розплаву на виході екструдера.

Моделі першого типу є моделями проектного розрахунку геометрії й частоти обертання робочих органів для певного значення продуктивності, яку має забезпечити екструдер в технологічній лінії. Очевидно, що для іншої продуктивності буде іншою й обчислена за моделлю першого типу геометрія. Оскільки екструдер може працювати і за інших значень продуктивності, то для аналізу його роботи потрібно будувати моделі другого типу, тобто моделі розрахунку екструдера за відомою геометрією робочих органів. У цій праці буде зроблено наголос на побудові моделей проектного розрахунку.

Авторами розроблено узагальнену схему алгоритму розрахунку екструдера (рис. 2.1), у якій використано модульний принцип.

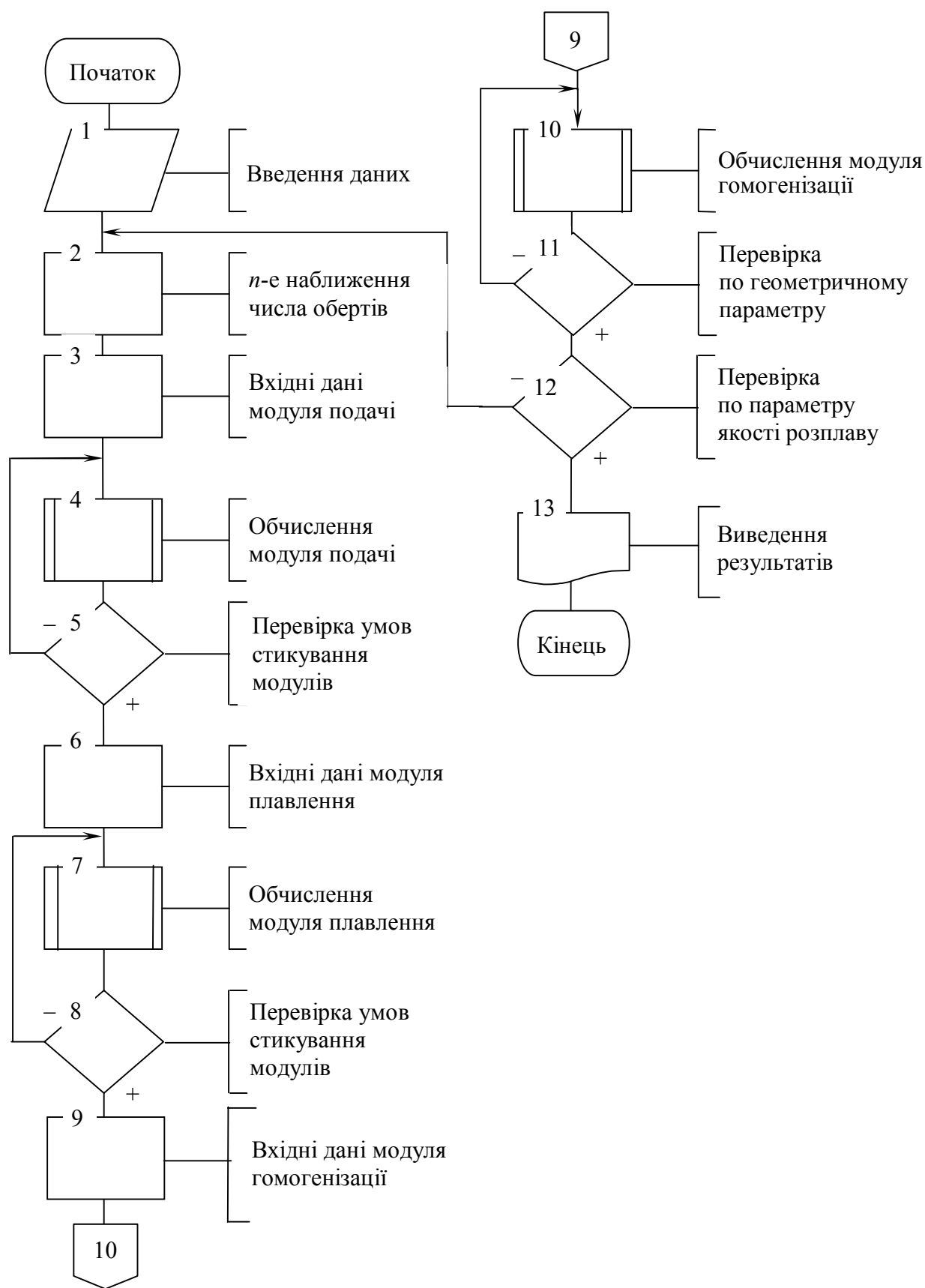


Рис. 2.1. Узагальнена схема алгоритму розрахунку екструдера

Згідно із зазначеним модульним принципом розрахунків елементів об'єму окремих функційних зон введений у вигляді модулів-підпрограм (блоки 4, 7, 10), які визначають конструктивну схему екструдера, під якою розуміється послідовність установки (сполучення) конструктивних елементів геометрії робочих органів. Конструктивні елементи задаються або визначаються у вхідних параметрах модулів (блоки 3, 6, 9). При цьому для моделей проектного розрахунку передбачається обчислення геометрії робочих органів, що відповідає заданим вимогам, а для моделей перевірного розрахунку геометрія робочих органів відома. Таким чином, у моделях проектного розрахунку геометрія визначається для кожного наближення змінюваного параметра (частоти обертання) і в кінцевому підсумку буде різною для кожного значення параметра розплаву, що задається у вхідних даних. Очевидно, що в обох типах моделей визначаються також енергетичні витрати, необхідні для конструювання приводу екструдера, і температура розплаву.

Оскільки проектний розрахунок черв'ячних екструдерів відповідно до розробленого алгоритму докладно описано в праці [58], то відповідно до викладеного задачею подальших досліджень є:

- формулювання математичних моделей процесів, що відбуваються в робочих органах дискового розплавлювача, і вибір умов, яким має відповідати їх геометрія;
- розв'язання математичних моделей і побудова алгоритму розрахунку розплавлювача;
- експериментальна перевірка результатів теоретичних розрахунків і корегування програми розрахунку;
- аналіз конструктивних змішувальних елементів та розробка математичних основ їх розрахунку.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ЗАВАНТАЖУВАЛЬНО-ПЛАСТИКУВАЛЬНОЇ ЗОНИ ДИСКОВОГО РОЗПЛАВЛЮВАЧА

3.1. Принципова схема дискового розплавлювача

Принципову схему дискового розплавлювача наведено на рис. 3.1. Полімер за допомогою дозатора або за відсутності дозованої подачі безпосередньо з бункера надходить до завантажувальної горловини 1 і транспортується багатозахідною гвинтовою нарізкою, виконаною на бічній поверхні обертового диска 2, в утворений корпусом і диском зазор 3. Плавлення полімеру й гомогенізація розплаву здійснюється в каналах гвинтової нарізки і в зазорі, а утворений розплав виходить крізь отвір 4.

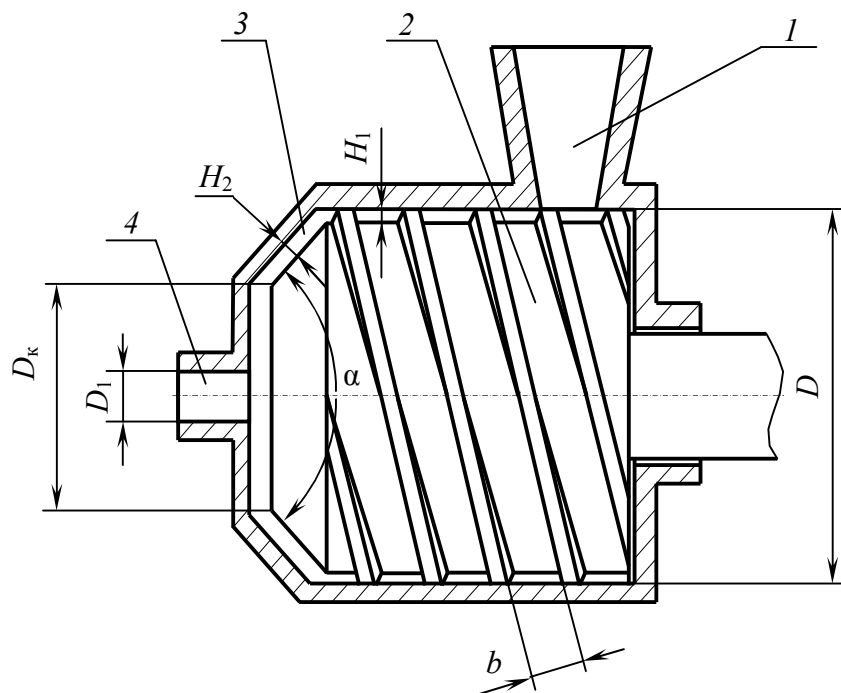


Рис. 3.1. Принципова схема дискового розплавлювача: 1 – завантажувальний отвір; 2 – диск; 3 – дисковий зазор; 5 – центральний випускний отвір корпусу; D , D_1 , D_k – діаметр внутрішньої поверхні корпусу, центрального випускного отвору корпусу та торцевої частини диска, відповідно, м; b , H_1 – ширина і глибина гвинтової нарізки циліндричної частини диска, відповідно, м; H_2 – величина дискового зазору, м; α – кут конічної частини диска, ...°

Під час перероблення ПКМ наповнювач може подаватись або разом з полімером у дисковий екструдер, або в черв'ячний екструдер. За роздільних приводів дозаторів та екструдерів створюються умови для ефективного керування процесом підготовки розплаву та його якістю зміною частоти обертання робочих органів екструдерів і величини зазору за умови фіксованої продуктивності.

Під час конструювання дискового розплавлювача для заданої продуктивності важливе значення мають геометричні розміри диска (зокрема його діаметр), конструкція гвинтової нарізки, які для кожного матеріалу й кожної продуктивності будуть своїми, а також частота обертання диска. Оскільки розплавлювач і каскадна схема в цілому мають гнучку ступінь керування процесом, то можливі й різні варіанти конструктивного виконання установки в цілому. Тому для одержання однозначного розв'язку математичних моделей при моделюванні необхідне формулювання додаткових умов.

3.2. Математична модель завантажувально-пластикувальної зони дискового розплавлювача

Завантажувально-пластикувальною будемо називати зону в каналах багатозахідної гвинтової нарізки диска. Під час обертання диска кожен із витків нарізки розташований під завантажувальним отвором впродовж $1/k$ частини оберту диска, де k – кількість заходів нарізки диска. Розглянемо розгорнуту на площину чотиризахідну гвинтову нарізку циліндричної частини диска (рис. 3.2).

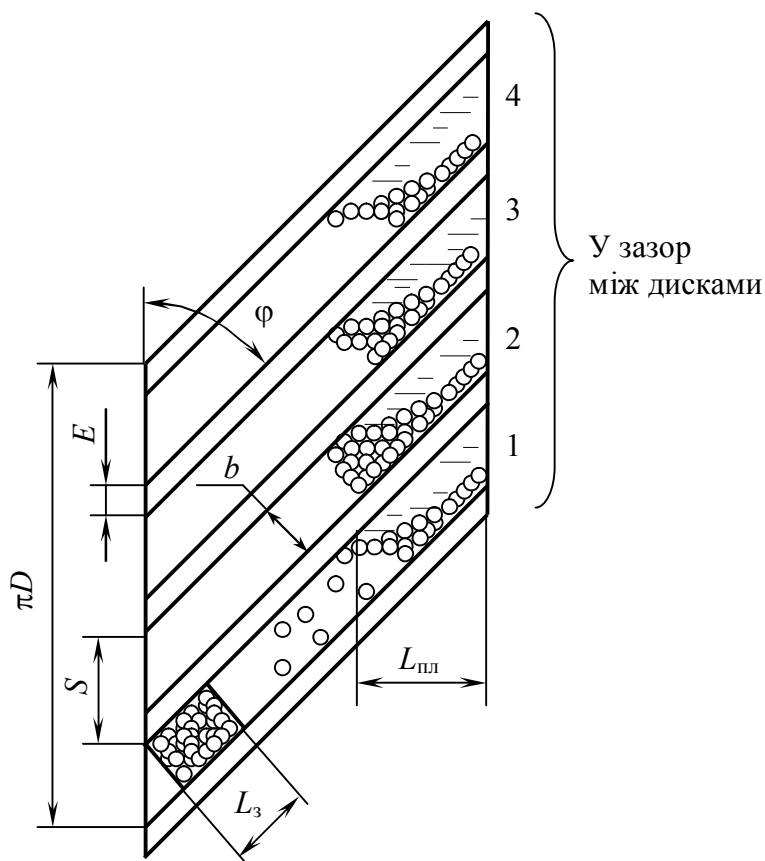


Рис. 3.2. Розрахункова схема завантажувально-пластикувальної зони: E , S , φ – ширина гребеня (м), крок (м) і кут підйому (...°) гвинтової нарізки, відповідно; L_z , $L_{пл}$ – довжина завантажувального отвору і довжина зони плавлення, відповідно, м

Припустімо, що канал 1 перебуває під завантажувальним отвором і в нього надходить полімер. Кількість полімеру в решті каналів (2–4) поступово зменшується, оскільки він безперервно надходить у зазор між дисками. За один оберт кожний із каналів перебуває під завантажувальним отвором тільки один раз, тому за відсутності дозатора масову продуктивність екструдера можна визначити за формулою

$$G = \psi \rho_n b H k L_3 n, \quad (3.1)$$

де G – масова продуктивність екструдера, кг/с; ψ – коефіцієнт заповнення каналу; ρ_n – насипна маса гранул, кг/м³; n – частота обертання диска, об/с.

На рис. 3.3 наведено обчислену за формулою (3.1) криву залежності продуктивності від частоти обертання диска (суцільна лінія) і для порівняння нанесено дослідні дані, одержані на екструдері з діаметром диска 200 мм і чотиризахідною нарізкою за різних значень опору на виході екструдера і за відсутності дозованої подачі. Криві одержані для величині зазору 3,5–4,0 мм.

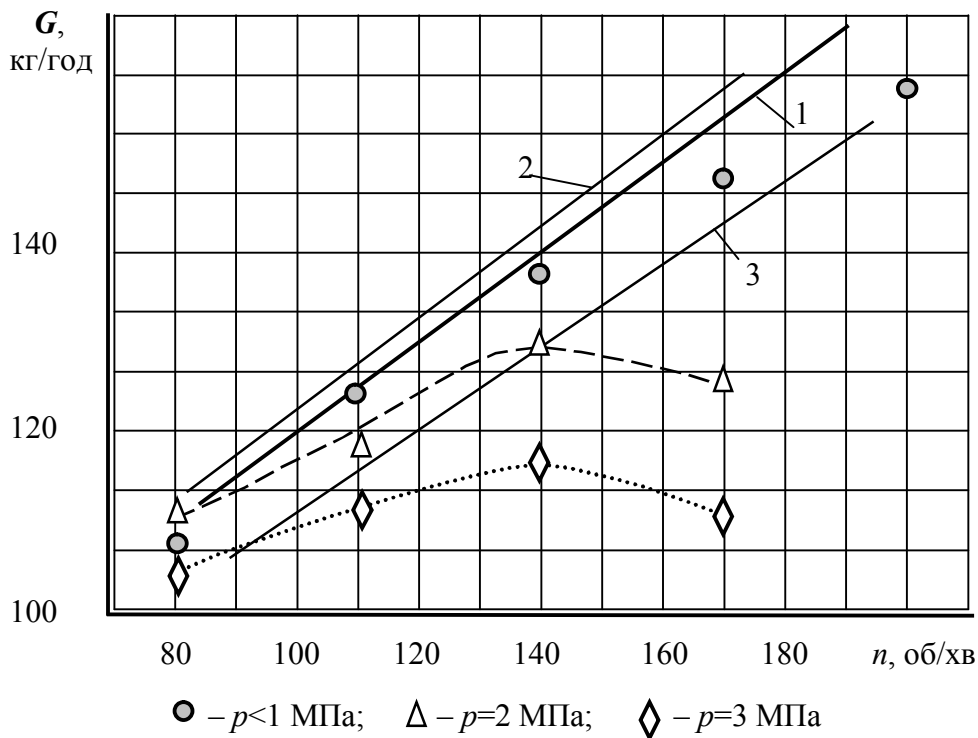


Рис. 3.3. Залежність продуктивності дискового екструдера від частоти обертання диска:
1 – теоретична лінія; 2 і 3 – експериментальні лінії, що обмежують область оптимальних режимів роботи екструдера

Як видно з рис. 3.3, розрахункові дані задовільно узгоджуються з експериментальними, якщо опір на виході екструдера не перевищує 1 МПа. Збільшення вихідного опору призводить до істотного зниження продуктивності, причому криві мають максимуми. Зменшення величини зазору нижче за певне

значення також призводить до зменшення продуктивності. При цьому відбувається збільшення довжини зони плавлення в каналах нарізки, що за значних лінійних швидкостей диска призводить до суттєвого підвищення температури розплаву. На рис. 3.4 наведено обчислені характерні криві залежності опору Δp зазору від його величини за постійної питомої масової продуктивності, аналіз яких показує, що опір зазору значний за малих значень висоти зазору H , а за умови збільшення цього зазору швидко зменшується.

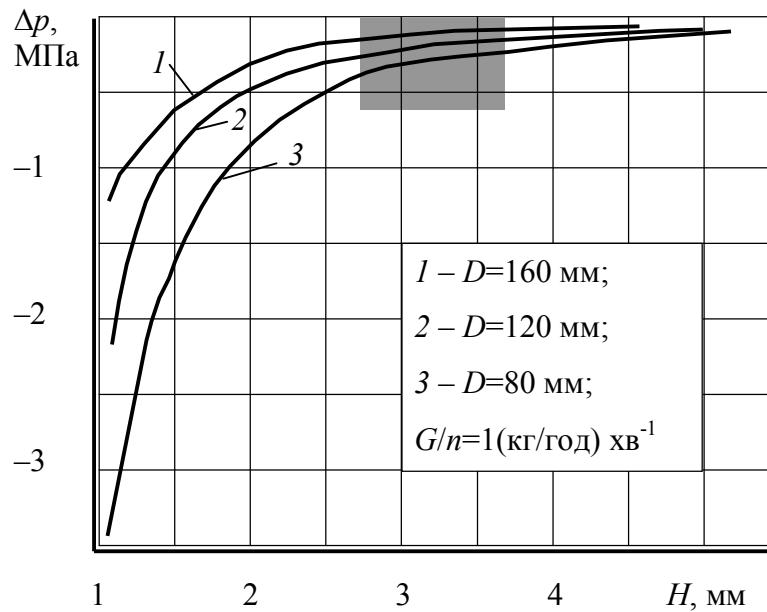


Рис. 3.4. Залежність опору від величини зазору між дисками

Таким чином, екструдер може працювати за різних режимів, які визначаються дозованою подачею, частотою обертання диска, величиною зазору та опором на виході. Тому для проектного розрахунку для одержання однозначного розв'язку сформулюємо умови, які накладають певні обмеження. Метою розрахунку вважатимемо визначення геометрії диска (діаметр, кількість заходів, глибини й ширина гвинтової нарізки) і частоти обертання, за яких для заданої продуктивності та оптимального зазору при опорі на виході до 1 МПа забезпечуються задані параметри розплаву на виході з екструдера. При цьому оптимальною величиною зазору вважатимемо його значення, що лежить у виділеній на рис. 3.4 області, коли невелика зміна величини H істотно не впливає на величину опору зазору. Зазначені вимоги відповідають визначеній експериментально області оптимальних режимів, обмежених кривими 2 і 3 на рис. 3.3. За наявності дозатора продуктивність при цьому змінюється, але вона не перевищить значень, визначених за рівнянням (3.1).

Експерименти показують, що за умови збільшення частоти обертання більше за певне значення зростання продуктивності сповільнюється, що можна пояснити тим, що гранули не встигають повністю заповнити об'єм каналу за час, коли він перебуває під завантажувальним отвором. Обчислимо частоту

обертання, за якого гранула під дією сил тяжіння встигає пройти шлях, що дорівнює глибині нарізки, за час, впродовж якого виток знаходиться під завантажувальним отвором. Прирівнюючи час опускання гранули на величину H з часом знаходження витка під завантажувальним отвором, одержимо

$$\sqrt{\frac{2H}{g}} = \frac{b}{\pi D n \sin \varphi}, \quad (3.2)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ,
звідки частота обертання

$$n = \frac{b}{\pi D \sin \varphi \sqrt{\frac{2H}{g}}}. \quad (3.3)$$

З рівнянь (3.1) і (3.3) можна одержати

$$b = \sqrt{D \frac{A_1}{A_2}} \quad (3.4)$$

і

$$n = \frac{A_1}{b}, \quad (3.5)$$

де

$$A_1 = \frac{G}{H k L_3 \rho_n \psi} \quad (3.6)$$

і

$$A_2 = \frac{1}{\pi \sin \varphi \sqrt{\frac{2H}{g}}}. \quad (3.7)$$

Таким чином, за відсутності дозованої подачі для даної продуктивності частота обертання, діаметр диска й геометрія гвинтової нарізки взаємно пов'язані і не можуть вибиратись незалежно. У разі дозованої подачі продуктивність менше або дорівнює значенню, визначеному за рівнянням (3.1) за умови відсутності дозатора. З іншого боку, геометричні розміри диска пов'язані залежністю, одержаною із геометричних співвідношень (див. рис. 3.1)

$$D \geq \frac{k(b + E)}{\pi \sin \varphi}. \quad (3.8)$$

Внаслідок специфічних особливостей дискового екструдера («голодна» подача, висока лінійна швидкість обертання та ін.) процес переміщення гранул до зони плавлення в каналах черв'ячної нарізки суттєвого впливу на кінцеві результати розрахунку з точки зору енергетичних витрат та якості розплаву не має і його в математичній моделі можна не враховувати. Процес плавлення в каналах гвинтової нарізки подібний до процесу плавлення в каналі черв'яка черв'ячного екструдера, якщо вважати, що продуктивність крізь кожний канал нарізки дорівнює $1/k$ продуктивності екструдера.

Для математичного опису використаємо підхід, розроблений у працях Маддока, Пірсона, Тадмора і уточнений в ряді наступних праць [80–81, 83, 84, 86, 87 та ін.], що описують процес плавлення зі зняттям плівки розплаву, дещо модифікувавши їх з метою використання моделі для розрахунку процесів плавлення, коли твердий полімер притискується до активної, пасивної сторін гребеня витка, або «плаває» в розплаві. Аналіз літературних даних показує, що найбільші енергетичні витрати під час плавлення мають місце в плівках розплаву, які утворюються біля стінок каналу. При цьому слід зазначити, що в разі дискового екструдера процес плавлення відбувається майже в адіабатичному (автогенному) режимі, тобто лише за рахунок дисипації енергії в плівках розплаву. Тому на відміну від традиційних граничних умов першого роду задачу будемо розв'язувати за граничних умов другого роду і в окремому випадку за рівності нулю теплових потоків на обмежуючих стінках каналу нарізки.

Розрахункову схему процесу плавлення наведено на рис. 3.5. Для подальшого аналізу використаємо плоскопаралельну модель черв'яка. Як видно з рис. 3.5, лінійну швидкість стінки циліндра $V = \pi D n$ можна розкласти на складові, одна з яких спрямована поперек (V_x), а друга вздовж (V_z) розгорнутого каналу черв'яка. Ці складові дорівнюють:

$$V_x = V \sin \varphi; \quad (3.9)$$

$$V_z = V \cos \varphi. \quad (3.10)$$

Плівка розплаву $\delta_{\text{ц}}$, що утворюється біля поверхні циліндра, безперервно зрізається гребенем витка та утворює область розплаву А. Залежно від градієнта тиску $\partial p / \partial x$ твердий полімер може притискуватися до пасивної сторони гребеня витка, «плавати» в розплаві (див. рис. 3.5), або навпаки, притискуватися до активної (передньої) сторони витка. Швидкість руху твердої пробки на початку зони плавлення можна обчислити за формулою

$$V_{\text{зт}} = \frac{G}{\rho_{\text{н}} b H_1}. \quad (3.11)$$

У подальшому ця швидкість дещо змінюється, оскільки змінюється глибина нарізки та співвідношення між витратами розплаву і твердого полімеру.

Розглянемо спочатку процес плавлення біля стінки циліндра, розмістивши початок координат на поверхні плавлення, яку вважаємо чітко вираженою. Оскільки швидкість по товщині плівки розплаву W_y набагато менша від складових W_x і W_z , то нею можна знехтувати. Процес екструзії вважатимемо стаціонарним, а тому похідні по часу в рівняннях переносу кількості руху та енергії дорівнюють нулю. Конвективні сили інерції й сили тяжіння набагато менші від сил в'язкості, тому ними також можна знехтувати.

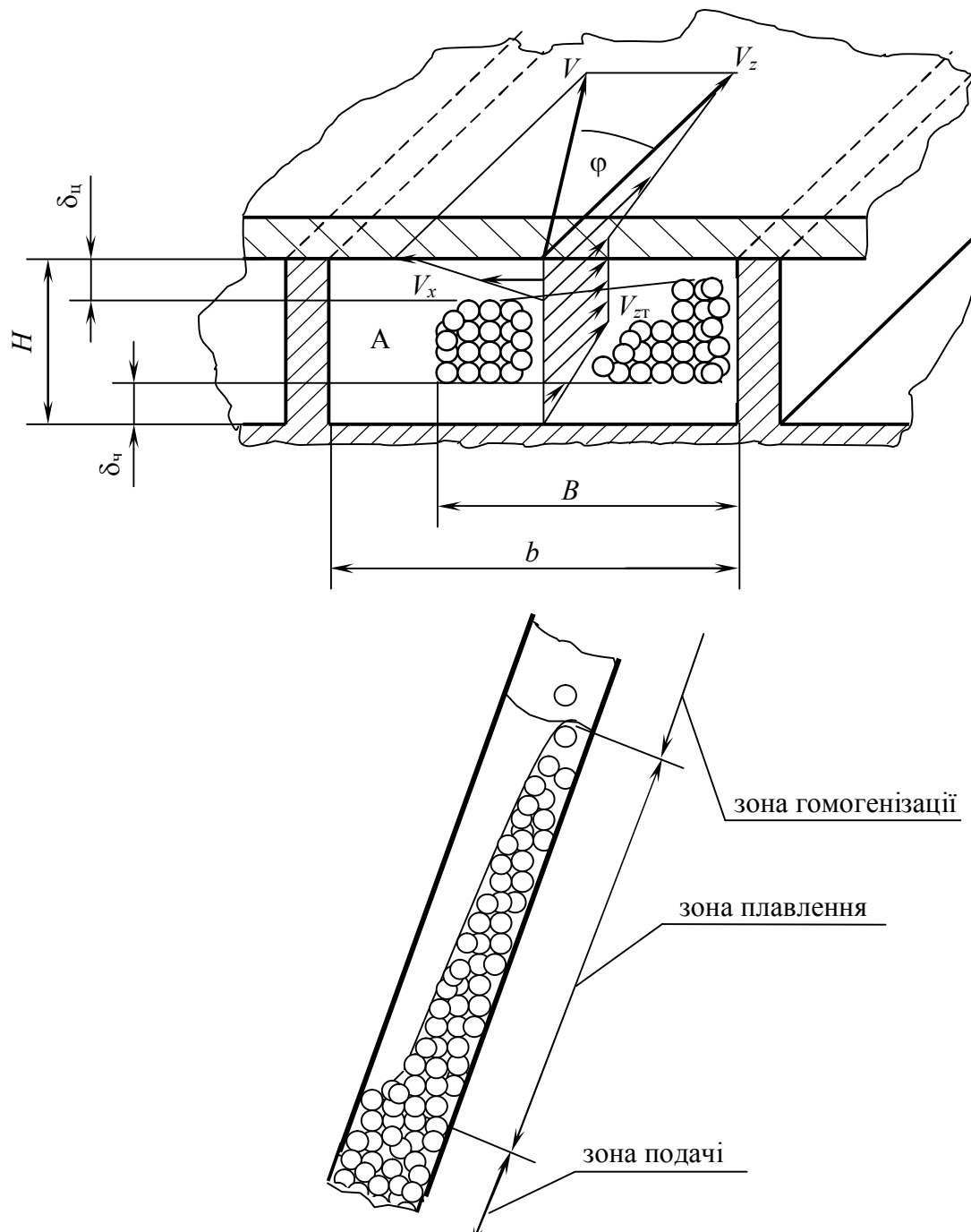


Рис. 3.5. Розрахункова схема процесу плавлення: B – ширина полімерної пробки в каналі, м

Розплав, що утворюється біля поверхні циліндра, частково транспортується в напрямку осі z під дією складової V_z , а частково переходить в область розплаву А під дією складової V_x . В умовах стаціонарного процесу встановлюється стан динамічної рівноваги, за якої товщина плівки розплаву $\delta_{\text{ц}}$, що транспортується в напрямку z , залишається майже постійною, а приріст витрати розплаву внаслідок наявності поперечної складової швидкості V_x переходить у зону розплаву А. Величина $\delta_{\text{ц}}$ перебуває в межах 1 мм і майже не залежить від величини зазору між гребенем витка та стінкою циліндра.

У тонких плівках навіть незначна зміна профілю швидкості потребує дуже високих градієнтів тиску, які в реальному процесі екструзії не реалізуються, а тому вплив градієнтів тиску в рівняннях збереження кількості руху можна не враховувати. Іншими словами, рух полімеру в плівці розплаву можна розглядати як рух у зазорі між нерухомою (поверхня плавлення) і рухомою (стінка циліндра) поверхнями в напрямку осі x і між поверхнями, що рухаються зі швидкостями V_{zt} (поверхня плавлення) і V_z (стінка циліндра) в напрямку z . Із компонент тензора напружень найбільшими будуть компоненти τ_{yx} і τ_{yz} , що діють на площині, перпендикулярній осі y . Тоді із врахуванням зазначених вище спрощень система рівнянь руху набуває вигляду:

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0; \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = 0. \quad (3.13)$$

Граничними умовами для їх розв'язання є:

$$\text{— для } y=0 \text{ (поверхня плавлення) } W_x=0; \quad W_z=V_{\text{zt}}; \quad (3.14)$$

$$\text{— для } y=\delta_{\text{ц}} \text{ (стінка циліндра) } W_x=V_x; \quad W_z=V_z. \quad (3.15)$$

де W_x і W_z – складові швидкості полімеру вздовж осей x і z , м/с, відповідно.

Рівняння переносу енергії для плівки розплаву має вигляд

$$\rho C \left(W_x \frac{\partial T}{\partial x} + W_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_{\text{дис}}, \quad (3.16)$$

де ρ , C , λ – густина (кг/м^3), масова теплоємність ($\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$) і теплопровідність ($\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$) розплаву як функції температури T (К), відповідно; $q_{\text{дис}}$ – об'ємна потужність дисипації, Вт/м^3 .

У рівнянні (3.16) приймається, що теплота дисипації переноситься конвекцією в напрямках x і z і теплопровідністю в напрямку y , тобто по товщині плівки. Оскільки розплав у плівці постійно оновлюється внаслідок безперервного плавлення й переходу утвореного розплаву в область А, складовою кон-

вективного переносу можна знехтувати. Потужність дисипації із врахуванням тільки найбільш суттєвих значень компонент напружень дорівнює

$$q_{\text{дис}} = \tau_{yx} \frac{\partial W_x}{\partial y} + \tau_{yz} \frac{\partial W_z}{\partial y}. \quad (3.17)$$

Із врахуванням сказаного рівняння (3.16) набуває вигляду

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \tau_{yx} \frac{\partial W_x}{\partial y} + \tau_{yz} \frac{\partial W_z}{\partial y} = 0. \quad (3.18)$$

У цьому рівнянні враховується тільки перенос теплоти дисипації теплопровідністю по товщині плівки розплаву. Граничні умови для його розв'язання мають вигляд:

$$- \text{для } y=0 \quad T=T_{\text{пл}}; \quad (3.19)$$

$$- \text{для } y=\delta_{\text{ц}} \quad \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=\delta_{\text{ц}}} = q_{\text{ц}}, \quad (3.20)$$

де $T_{\text{п}}$ – температура плавлення полімеру, К, $q_{\text{ц}}$ – поверхнева густина теплового потоку, що підводиться від нагрівників, Вт/м²; $N_{\text{ц}}$ – потужність цих нагрівників, Вт; $L_{\text{н}}$ – довжина циліндра, на якій розміщені нагрівники, м.

Тут і далі тепловий потік, що підводиться до полімеру, вважатимемо додатнім, а тепловий потік, що відводиться, відповідно, від'ємним. Тоді значення теплового потоку дорівнює

$$q_{\text{ц}} = \frac{N_{\text{ц}}}{\pi D L_{\text{н}}}. \quad (3.21)$$

Для визначення товщини плівки $\delta_{\text{ц}}$ складемо рівняння теплового балансу для поверхні плавлення, відповідно до якого теплота, що підводиться до поверхні плавлення, витрачається на нагрівання та плавлення твердого полімеру

$$q_{|y=0} B dz = dG_p (i_{\text{пл}} - i_{\text{вх}}), \quad (3.22)$$

де B – ширина нерозплавленого полімеру, м; $q_{|y=0}$ – тепловий потік із плівки розплаву до твердого полімеру на поверхні плавлення, Вт/м²; dG_p – приріст масової витрати розплаву в елементі dz , кг/с; $i_{\text{пл}}$ та $i_{\text{вх}}$ – масові ентальпії полімеру за температур плавлення і входу його в екструдер, Дж/кг.

Відповідно до рівняння Фур'є тепловий потік на поверхні плавлення дорівнює

$$q|_{y=0} = \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}. \quad (3.23)$$

Як вище згадувалось, весь приріст масової витрати в елементі, що розглядається, переходить в область розплаву А, а тому можна записати

$$dG_p = \rho \delta_{\text{ц}} dz W_c, \quad (3.24)$$

де W_c – середня швидкість руху розплаву в область А (див. рис. 3.5), що дорівнює

$$W_c = \frac{1}{\delta_{\text{ц}}} \int_0^{\delta_{\text{ц}}} W_x dy. \quad (3.25)$$

Підставляючи (3.23), (3.24) і (3.25) у рівняння (3.22), одержимо після скорочення на dz

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} B = \rho (i_{\text{пл}} - i_{\text{вх}}) \int_0^{\delta_{\text{ц}}} W_x dy. \quad (3.26)$$

Для визначення ширини нерозплавленого полімеру B запишемо рівняння масової витрати, яка є сумою витрат розплаву і твердого полімеру. Оскільки товщина плівок розплаву мала, то з достатньою точністю це рівняння можна записати

$$G = \rho_{\text{н}} B H V_{\text{зт}} + \int_0^z (W_c \rho \delta_{\text{ц}}) dz, \quad (3.27)$$

де середня швидкість розплаву W_c (м/с) визначається за формулою (3.25).

Перша складова рівняння (3.27) є витратою твердого полімеру, а друга – сумарною для всіх елементів dz витратою розплаву, що переходить в область А.

Таким чином, система рівнянь (3.12)–(3.15), (3.18)–(3.21) і (3.25)–(3.27) разом з реологічним рівнянням і функціями, що описують залежність теплофізичних властивостей полімеру від температури, є математичною моделлю процесу плавлення в плівці розплаву біля поверхні циліндра. У цій плівці реалізуються основні енергетичні витрати.

Компоненти тензора напружень у рівняннях (3.12), (3.13) і (3.18) дорівнюють

$$\tau_{yx} = \mu(\dot{\gamma}, T) \frac{\partial W_x}{\partial y} \quad (3.28)$$

і

$$\tau_{yz} = \mu(\dot{\gamma}, T) \frac{\partial W_z}{\partial y}, \quad (3.29)$$

де $\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\gamma}_x^2 + \dot{\gamma}_z^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial W_x}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial y}\right)^2}$ – швидкість зсуву, с^{-1} .

Відповідно до методу ступеневої апроксимації в межах елемента Δz в'язкість вважатимемо постійною й визначати її по швидкості зсуву і середній для даного елемента температурі T_c . Тоді рівняння руху після підстановки в них виразів (3.28) і (3.29) набувають вигляду:

$$\mu \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} = 0; \quad (3.30)$$

$$\mu \frac{\partial^2 W_z}{\partial y^2} = 0. \quad (3.31)$$

Інтегрування цих рівнянь за граничних умов (3.14) і (3.15) дає лінійний розподіл компонент швидкостей у півці розплаву:

$$W_x = V_x \frac{y}{\delta_{\text{ц}}}; \quad (3.32)$$

$$W_z = V_{z\text{т}} + (V_z - V_{z\text{т}}) \frac{y}{\delta_{\text{ц}}}. \quad (3.33)$$

Відповідно компоненти швидкості зсуву дорівнюють:

$$\dot{\gamma}_x = \frac{\partial W_x}{\partial y} = \frac{V_x}{\delta_{\text{ц}}}; \quad (3.34)$$

$$\dot{\gamma}_z = \frac{\partial W_z}{\partial y} = \frac{V_z - V_{z\text{т}}}{\delta_{\text{ц}}}. \quad (3.35)$$

Підставляючи вирази для τ_{yx} і τ_{yz} у рівняння енергії (3.18), одержимо

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \mu \left[\left(\frac{\partial W_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial W_z}{\partial y} \right)^2 \right] = 0. \quad (3.36)$$

Після підстановки в (3.36) компонент швидкості зсуву маємо

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \mu \frac{V_j^2}{\delta_{\text{ц}}^2} = 0, \quad (3.37)$$

де V_j – результуюча швидкість плівки розплаву біля поверхні циліндра, м/с.

$$V_j = \sqrt{V_x^2 + (V_z - V_{z\text{т}})^2}. \quad (3.38)$$

Зінтегруємо двічі по y рівняння (3.37):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = -\frac{\mu}{\lambda} \left(\frac{V_j}{\delta_{\text{ц}}} \right)^2; \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{\mu}{\lambda} \left(\frac{V_j}{\delta_{\text{ц}}} \right)^2 y + C_1; \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{\mu}{\lambda} \left(\frac{V_j}{\delta_{\text{ц}}} \right)^2 y + C_1. \quad (3.41)$$

Із граничної умови (3.19) одержимо $C_2 = T_{\text{пл}}$. Підставимо в (3.39) граничну умову (3.20)

$$\frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{\mu}{\lambda} \left(\frac{V_j}{\delta_{\text{ц}}} \right)^2 y + C_1, \quad (3.42)$$

звідки

$$C_1 = \frac{q_{\text{ц}}}{\lambda} + \frac{\mu V_j^2}{\lambda \delta_{\text{ц}}}. \quad (3.43)$$

Підставляючи в рівняння (3.41) вирази для сталих інтегрування, одержимо функцію, що описує профіль температур в плівці розплаву

$$T = T_{\text{пл}} + \frac{q_{\text{ц}} y}{\lambda} + \frac{\mu V_j^2}{\lambda} \left(\frac{y}{\delta_{\text{ц}}} - \frac{y^2}{\delta_{\text{ц}}^2} \right). \quad (3.44)$$

Середню температуру цієї плівки визначимо так

$$T_c = \frac{1}{\delta_{\text{ц}}} \int_0^{\delta_{\text{ц}}} T dy = \frac{1}{\delta_{\text{ц}}} \int_0^{\delta_{\text{ц}}} \left[T_{\text{пл}} + \frac{q_{\text{ц}} y}{\lambda} + \frac{\mu V_j^2}{\lambda} \left(\frac{y}{\delta_{\text{ц}}} - \frac{y^2}{2\delta_{\text{ц}}^2} \right) \right] dy. \quad (3.45)$$

Після інтегрування одержимо

$$T_c = T_n + \frac{q_{\text{ц}} \delta_{\text{ц}}}{2\lambda_{\text{ц}}} + \frac{\mu V_j^2}{3\lambda_{\text{ц}}}. \quad (3.46)$$

Відповідно температуру стінки циліндра $T_{\text{ц}}$ визначимо з рівняння (3.44), підставивши в нього $y = \delta_{\text{ц}}$

$$T_{\text{ц}} = T_{\text{пл}} + \frac{q_{\text{ц}} \delta_{\text{ц}}}{\lambda} + \frac{\mu V_j^2}{2\lambda}. \quad (3.47)$$

Якщо температура $T_{\text{ц}}$ задається, то з рівняння (3.47) можна визначити тепловий потік від нагрівників, необхідний для її підтримання

$$q_{\text{ц}} = \frac{T_{\text{ц}} - T_{\text{пл}}}{\delta_{\text{ц}}} \lambda - \frac{\mu V_j^2}{2\delta_{\text{ц}}}. \quad (3.48)$$

Як випливає з рівняння (3.48), залежно від значення $T_{\text{ц}}$ можливі три випадки: $q_{\text{ц}} > 0$, $q_{\text{ц}} = 0$ і $q_{\text{ц}} < 0$. У випадку дискового екструдера найбільш доцільно процес плавлення вести в автогенному режимі, який відповідає другому випадку, коли $q_{\text{ц}} = 0$. При цьому плавлення здійснюється тільки за рахунок теплоти дисипації.

Підставивши в рівняння (3.26) вираз (3.44) і (3.32) та здійснивши диференціювання при $y = 0$ та інтегрування, одержимо

$$\left(q_{\text{ц}} + \frac{\mu V_j^2}{\delta_{\text{ц}}} \right) B = \rho (i_{\text{пл}} - i_{\text{вх}}) \delta_{\text{ц}} \frac{V_x}{2}. \quad (3.49)$$

З виразу (3.49) одержимо квадратне рівняння для визначення товщини плівки розплаву, що утворюється на стінці циліндра

$$\delta_{\text{ц}}^2 - \frac{2Bq_{\text{ц}}}{\rho(i_{\text{пл}} - i_{\text{вх}})V_x} \delta_{\text{ц}} - \frac{2B\mu V_j^2}{\rho(i_{\text{пл}} - i_{\text{вх}})V_x} = 0. \quad (3.50)$$

Додатній корінь цього рівняння дорівнює

$$\delta_{\text{ц}} = \frac{B \left[q_{\text{ц}} + \sqrt{q_{\text{ц}}^2 + 2V_x \rho (i_{\text{пл}} - i_{\text{вх}}) \mu V_j^2 / B} \right]}{V_x \rho (i_{\text{пл}} - i_{\text{вх}})}. \quad (3.51)$$

Підставимо в рівняння (3.25) вираз (3.32) і одержимо середню швидкість плівки розплаву

$$W_c = \frac{1}{\delta_{\text{ц}}} \int_0^{\delta_{\text{ц}}} \frac{V_x y}{\delta_{\text{ц}}} dy = \frac{V_x}{2}. \quad (3.52)$$

Приріст масової витрати розплаву для елемента $\Delta z = (z_2 - z_1)$ відповідно до (3.24) дорівнює

$$\Delta G_p = \rho \delta_{\text{ц}} \Delta z \frac{V_x}{2}. \quad (3.53)$$

Для визначення ширини нерозплавленого полімеру B скористуємось рівнянням (3.27), підставивши в нього значення середньої швидкості. Тоді для j -го елемента Δz одержимо

$$G = \rho_{\text{н}} B H V_{\text{зт}} + \frac{V_x}{2} \Delta z \sum_{i=1}^j (\rho_i \delta_{\text{ци}}). \quad (3.54)$$

З виразу (3.54) ширина нерозплавленого полімеру дорівнює

$$B = \frac{2G - V_x \Delta z \sum_{i=1}^j (\rho_i \delta_{\text{ци}})}{2V_{\text{зт}} \rho_{\text{н}} H}. \quad (3.55)$$

Потужність дисипації та нагрівників витрачається на підвищення ентальпії полімеру. Рівняння теплового балансу для елемента Δz при цьому має вигляд

$$\Delta G_p (i_{\text{с}} - i_{\text{вх}}) = \Delta N_{\text{д}} + \Delta N_{\text{н}}, \quad (3.56)$$

де $i_{\text{с}}$ – масова ентальпія розплаву при температурі $T_{\text{с}}$, Дж/кг; а $\Delta N_{\text{н}} = q_{\text{ц}} B \Delta z$ – потужність нагрівників циліндра, Вт.

Після підстановки (3.53) у рівняння (3.56) одержимо вираз для визначення потужності дисипації

$$\Delta N_{\text{д}} = \rho \delta_{\text{ц}} \Delta z \frac{V_x}{2} (i_{\text{с}} - i_{\text{вх}}) - q_{\text{ц}} B \Delta z. \quad (3.57)$$

Як вище зазначалось, основні енергетичні витрати мають місце в плівці розплаву біля поверхні циліндра. Для більш точного опису врахуємо також утворення плівки розплаву і біля поверхні черв'яка завтовшки $\delta_{\text{ч}}$. Якщо припустити, що циркуляція розплаву в поперечному напрямку навколо твердого полімеру майже відсутня, то товщина плівки $\delta_{\text{ч}}$ по довжині зони плавлення зростатиме.

Розмістимо початок координат на поверхні черв'яка і будемо розглядати течію розплаву в плівці $\delta_{\text{ч}}$ як течію між двома поверхнями, одна з яких рухається зі швидкістю $V_{\text{зт}}$ (поверхня поділу), а друга є нерухомою (поверхня черв'яка, див. рис. 3.5). Вводячи припущення, аналогічні припущенням, прийнятим під час розгляду процесу біля поверхні циліндра, запишемо рівняння руху у вигляді

$$\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = 0, \quad (3.58)$$

де $\tau_{yz} = \mu(\dot{\gamma}_q, T_{сч}) \frac{\partial W_z}{\partial y}$ – компонента тензора напружень, Па, $\dot{\gamma}_q = \frac{\partial W_z}{\partial y}$ – швидкість зсуву, c^{-1} ; $T_{сч}$ – середня температура плівки розплаву δ_q , К.

Із врахуванням спрощень методу ступеневої апроксимації в результаті розв’язання рівняння (3.58) за граничних умов $W_z(0) = 0$ і $W_z(\delta_q) = V_{зт}$ одержимо вираз для швидкості

$$W_z = V_{зт} \frac{y}{\delta_q} \quad (3.59)$$

і швидкості зсуву

$$\dot{\gamma}_q = \frac{\partial W_z}{\partial y} = \frac{V_{зт}}{\delta_q}. \quad (3.60)$$

Вважаючи, що теплота дисипації переноситься тільки внаслідок теплопровідності по товщині плівки (координаті y), запишемо рівняння енергії для плівки розплаву

$$\lambda_q \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \mu_q \left(\frac{\partial W_z}{\partial y} \right)^2 = 0, \quad (3.61)$$

де λ_q – теплопровідність розплаву біля черв’яка, Вт/(м·К); μ_q – в’язкість розплаву в плівці δ_q , Па·с.

Граничні умови для розв’язання рівняння (3.61) мають вигляд:

$$\text{– для } y=0 \quad -\lambda_q \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = q_q, \quad (3.62)$$

$$\text{– для } y=\delta_q \quad T=T_{пл}, \quad (3.63)$$

де q_q – тепловий потік, який підводиться (відводиться) системою нагрівання (охолодження) черв’яка. За відсутності цієї системи нагрівання $q_q=0$.

Підставимо в (3.61) значення швидкості зсуву

$$\lambda_q \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \mu_q \left(\frac{V_{зт}}{\delta_q} \right)^2 = 0 \quad (3.64)$$

і двічі зінтегруємо його, в результаті чого одержимо

$$\frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{\mu_{\text{ч}}}{\lambda_{\text{ч}}} \left(\frac{V_{\text{зТ}}}{\delta_{\text{ч}}} \right)^2 y + C_1 \quad (3.65)$$

i

$$T = -\frac{\mu_{\text{ч}}}{2\lambda_{\text{ч}}} \left(\frac{V_{\text{зТ}}}{\delta_{\text{ч}}} \right)^2 y^2 + C_1 y + C_2. \quad (3.66)$$

Із граничної умови (3.62) одержимо $C_1 = \frac{q_{\text{ч}}}{\lambda_{\text{ч}}}$, а з граничної умови (3.61), відповідно

$$T_{\text{пл}} = -\frac{\mu_{\text{ч}}}{\lambda_{\text{ч}}} \left(\frac{V_{\text{зТ}}}{\delta_{\text{ч}}} \right)^2 \delta_{\text{ч}}^2 + \frac{q_{\text{ч}} \delta_{\text{ч}}}{\lambda_{\text{ч}}} + C_2. \quad (3.67)$$

З виразу (3.67) визначаємо сталу інтегрування C_2

$$C_2 = T_{\text{пл}} + \frac{q_{\text{ч}} \delta_{\text{ч}}}{\lambda_{\text{ч}}} + \frac{\mu_{\text{ч}} V_{\text{зТ}}^2}{2\lambda_{\text{ч}}}. \quad (3.68)$$

Підставивши значення постійних інтегрування в рівняння (3.65), одержимо вираз, що описує розподіл температур в плівці розплаву

$$T = T_{\text{пл}} + \frac{q_{\text{ч}}}{\lambda_{\text{ч}}} (y - \delta_{\text{ч}}) + \frac{\mu_{\text{ч}}}{2\lambda_{\text{ч}}} \left(\frac{V_{\text{зТ}}}{\delta_{\text{ч}}} \right)^2 (\delta_{\text{ч}}^2 - y^2). \quad (3.69)$$

Середня температура плівки розплаву дорівнює

$$T_{\text{сч}} = \frac{1}{\delta_{\text{ч}}} \int_0^{\delta_{\text{ч}}} T dy. \quad (3.70)$$

Підставивши (3.69) у (3.70) і виконавши інтегрування, одержимо

$$T_{\text{сч}} = T_{\text{пл}} - \frac{q_{\text{ч}} \delta_{\text{ч}}}{2\lambda_{\text{ч}}} + \frac{\mu_{\text{ч}} V_{\text{зТ}}^2}{3\lambda_{\text{ч}}}. \quad (3.71)$$

Прийнявши значення координати $x=1$, визначимо потужність дисипації в об'ємі елемента $\Delta V = 1 \Delta z \delta_{\text{ч}}$

$$\Delta N_{\text{дч}}' = \iiint_{\Delta V} \mu_{\text{ч}} \left(\frac{\partial W_z}{\partial y} \right)^2 dx dy dz = \mu_{\text{ч}} \Delta z \frac{V_{\text{зТ}}^2}{\delta_{\text{ч}}}. \quad (3.72)$$

Масова витрата розплаву, що утворюється на поверхні плавлення 1 Δz , дорівнює

$$\Delta G_{\text{рч}}' = \frac{\Delta N_{\text{дч}}' + q_{\text{ч}} \Delta z}{i_{\text{сч}} - i_{\text{вх}}}, \quad (3.73)$$

де $i_{\text{сч}}$ – масова ентальпія полімеру за температури $T_{\text{сч}}$, Дж/кг.

Тоді товщина плівки розплаву для j -го елемента дорівнює

$$\delta_{\text{ч}} = \frac{2 \sum_{i=1}^j \Delta G_{\text{рч}}'}{\rho_{\text{ч}} V_{\text{зт}}}. \quad (3.74)$$

Масову витрату розплаву, що утворюється на поверхні плавлення $B \Delta z$, визначимо за залежністю

$$\Delta G_{\text{рч}} = \Delta G_{\text{рч}}' B. \quad (3.75)$$

Відповідно потужність дисипації в об'ємі $B \delta_{\text{ч}} \Delta z$ дорівнює

$$\Delta N_{\text{дч}} = \Delta N_{\text{дч}}' B. \quad (3.76)$$

Середню температуру плівки розплаву, що утворюється біля поверхні черв'яка, визначимо за рівнянням

$$T_{\text{р}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^j (\Delta G_{\text{р}} + \Delta G_{\text{рч}})} \sum_{i=1}^j (\Delta G_{\text{рi}} T_{\text{сi}} + \Delta G_{\text{рчi}} T_{\text{счi}}). \quad (3.77)$$

Механізм процесу плавлення в каналі нарізки закінчується при вході в дисковий зазор. При цьому досягається певне співвідношення між витратами розплаву і твердого полімеру, яке, як показують експериментальні дані, при виконанні викладених вище умов моделювання, становить $(0,5-0,6)G$. Отже, в зазор між дисками надходить суміш розплаву й нерозплавленого полімеру і внаслідок цього під час розрахунку зони гомогенізації виникає потреба у виділенні деякої перехідної області, в межах якої завершується плавлення решти твердого полімеру.

Одержана система рівнянь разом з функціями, що описують залежність теплофізичних властивостей полімеру від температури і в'язкості розплаву від температури і швидкості зсуву, надає змогу побудувати алгоритм розрахунку процесу плавлення.

3.3. Алгоритм розрахунку модуля плавлення

Алгоритм розрахунку модуля плавлення за умови використання методу ступеневої апроксимації доцільно подати у вигляді алгоритму розрахунку одного елемента ΔL . Параметри модуля плавлення обчислюються із застосуванням методу послідовних наближень, тому для першого наближення приймають значення, обчислені в попередньому модулі, а під час розрахунку першого модуля вони задаються (або обчислюються) в програмі розрахунку екструдера.

Оскільки в розрахункові формули входять суми, то перед розрахунком першого модуля необхідно задати рівними нулю значення цих сум, які позначені так:

$$G_{\text{рц}} = \sum_{i=1}^j \Delta G_{\text{рц}i}, \text{ кг/с};$$

$$G_{\text{рч}} = \sum_{i=1}^j \Delta G_{\text{рч}i}, \text{ кг/с};$$

$$G'_{\text{рч}} = \sum_{i=1}^j \Delta G'_{\text{рч}i}, \text{ кг/с};$$

$$ST_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^j T_{\text{сц}i} \Delta G_{\text{рц}i};$$

$$ST_{\text{ч}} = \sum_{i=1}^j T_{\text{сч}i} \Delta G_{\text{рч}i};$$

$$N_{\text{д}} = \sum_{i=1}^j \Delta N_{\text{д}i}, \text{ Вт};$$

$$N_{\text{н}} = \sum_{i=1}^j \Delta N_{\text{н}i}, \text{ Вт}.$$

Крім цього задаються початкові наближення товщини плівок $\delta_{\text{ц}}$ і $\delta_{\text{ч}}$ та середні температури цих плівок $T_{\text{сц}}$ і $T_{\text{сч}}$, які для розрахунку першого модуля можна прийняти рівними температурі плавлення.

Схему алгоритму розрахунку наведено на рис. 3.6.

В алгоритмі передбачено два ітераційних цикли – внутрішній для розрахунку товщини плівок (блоки 3–9) і зовнішній – для обчислення середніх температур цих плівок (блоки 2–13). При цьому в блоці 1 вводяться вхідні дані й початкові наближення, а в блоці 2 обчислюються теплофізичні властивості розплаву. Відповідно в блоці 3 визначаються швидкості зсуву в плівках розплаву та в'язкість. Уточнення значень товщин плівок і ширини нерозплавленого полімеру та визначення похибок попереднього й поточного наближень здійснюється в блоках 4–7. Якщо ці похибки перевищують задане значення ε_0 , то блоки 8 або 9 здійснюють перехід на блок 3 для розрахунку наступного наближення.

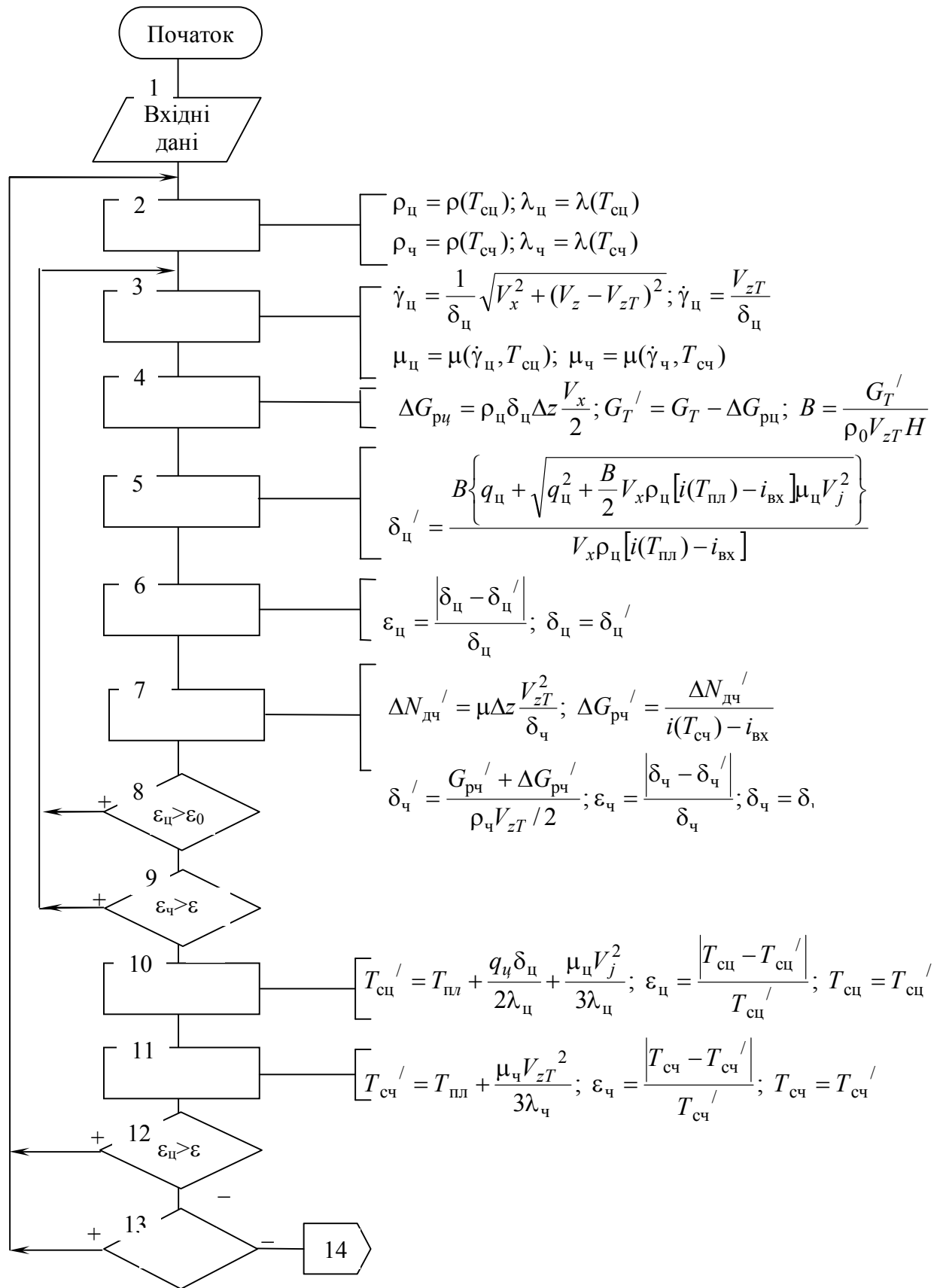


Рис. 3.6. Алгоритм розрахунку модуля плавлення

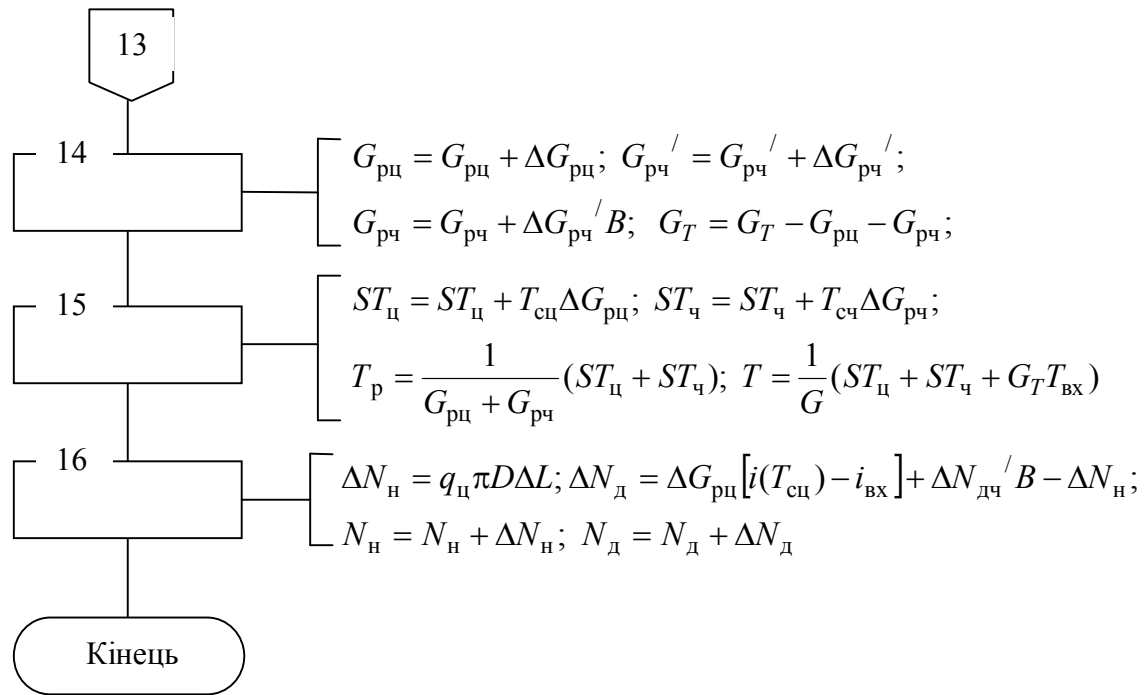


Рис. 3.6. Закінчення. (Див. також с. 46)

Уточнення значень середніх температур плівок розплаву здійснюється в блоках 10–11 і, якщо похибка їх визначення перевищує задану, то блоки 12 і 13 забезпечують перехід на блок 2 для продовження ітераційних циклів. Сумарні значення витрат розплаву, твердого полімеру G_T , температур, потужностей нагрівників і дисипації обчислюються в блоках 14–16.

Описаний алгоритм розрахунку модуля плавлення призначений для застосування в програмах розрахунку екструдерів як блок-підпрограма.

4. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ В ЗАЗОРІ МІЖ ДИСКАМИ

Як вище зазначалось, при виконанні сформульованих вище обмежень в каналах гвинтової нарізки утворюється приблизно 50–60 % розплаву. Аналіз зліпків, одержаних після зупинки розплавлювача, дозволяє припустити, що твердий полімер в повністю заповненій області відтісняється розплавом у верхню частину зазору і плавлення відбувається внаслідок дисипації енергії в плівках розплаву δ_1 і δ_2 , що утворюються біля поверхонь дисків, рис. 4.1,*а*. Це можна пояснити тим, що тиск зростає внаслідок ефекту нормальної наруги (Вайссенберга) в розплаві в напрямі осі диска.

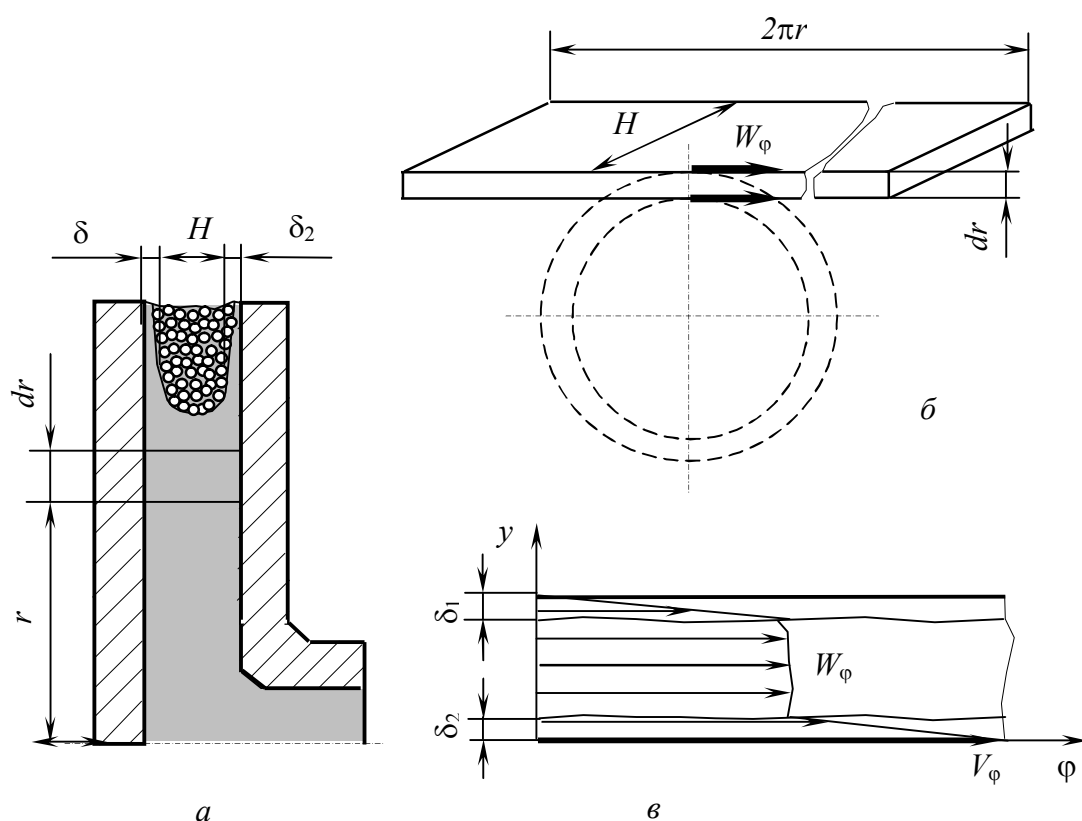


Рис. 4.1. Схема процесу в зазорі між дисками

Оскільки швидкість обертання диска набагато перевищує радіальну швидкість розплаву, то дисипативні тепловиділення відбуваються передусім внаслідок швидкості зсуву в тангенціальному напрямі. Для аналізу виділимо на радіусі r елемент dr і розгорнемо його на площину (рис. 4.1,*б*). Це дає змогу розглядати процес в прямокутній системі координат, спрямувавши вісь r по радіусу, вісь y перпендикулярно площині диска (по висоті зазору H), а ось ϕ в тангенціальному напрямку (див. рис. 4.1,*б*). Таке припущення допустиме, якщо застосувати метод ступеневої апроксимації й вибрати значення dr достатньо малим, вважаючи при цьому, що в межах елемента dr низка параметрів (величина зазору H , радіальна W_r і тангенціальна W_ϕ складові швидкості та ін.)

незмінні, а їх зміна відбувається на межі елементів dr стрибкоподібно. Іншими словами, замінюємо безперервну зміну параметрів ступеневою. Вважатимемо далі, що в напрямку φ швидкість змінюється від нуля на поверхні нерухомого диска до значення $V_\varphi = 2\pi r n$ на поверхні обертового диска, причому в межах нерозплавленого полімеру вона приблизно постійна. Враховуючи, що сили в'язкісного тертя в плівках розплаву δ_1 і δ_2 приблизно однакові, вважатимемо, що і значення δ_1 і δ_2 також приблизно однакові, тобто $\delta = \delta_1 = \delta_2$. Розглянемо спочатку процес закінчення плавлення, розмістивши початок координат на поверхні нерухомого диска. Оскільки швидкість обертання набагато більша за радіальну, процес вважатимемо вісесиметричним відносно осі диска. Рівняння переносу енергії в загальному вигляді записується так [24, 82]

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + W_r \frac{\partial T}{\partial r} + W_y \frac{\partial T}{\partial y} + W_\varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) + q_V, \quad (4.1)$$

де W_r , W_y і W_φ – складові швидкості вздовж радіуса, поперек зазору і в колдовому напрямку диска, відповідно, м/с; q_V – інтенсивність дисипації в об'ємі розплаву, Вт/м³.

Процес вважаємо стаціонарним ($\partial T / \partial t = 0$). Оскільки розплав прилипає до поверхні, а його швидкість в плівці в радіальному напрямі незначна, процес вісесиметричний, а складовою швидкості W_y можна знехтувати, то ліву частину рівняння для плівки розплаву можна вважати рівною нулю. Товщина плівки δ незначна, а отже можна вважати, що перенесення теплоти теплопровідністю відбувається переважно по товщині цієї плівки, тобто по координаті y . Із врахуванням цих спрощень рівняння (4.1) набуває вигляду

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_V = 0. \quad (4.2)$$

Граничні умови для розв'язання рівняння (4.2):

$$\text{– для } y = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad (4.3)$$

$$\text{– для } y = \delta \quad T = T_{\text{пл}}. \quad (4.4)$$

Умова (4.3) означає відсутність теплообміну з навколишнім середовищем (адіабатичні умови), а умова (4.4) те, що на поверхні поділу «полімер – плівка розплаву» температура дорівнює температурі плавлення $T_{\text{пл}}$.

Двічі інтегруючи рівняння (4.2), одержимо:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{q_V}{\lambda} y + C_1; \quad (4.5)$$

$$T = -\frac{q_V}{2\lambda} y^2 + C_1 y + C_2. \quad (4.6)$$

Підставляючи граничні умови (4.3) у рівняння (4.5) і граничну умову (4.4) у рівняння (4.6), знаходимо сталі інтегрування: $C_1 = 0$, $C_2 = T_{\text{пл}} + \frac{q_V}{2\lambda} \delta^2$. Тоді профіль температур в плівці розплаву описується рівнянням

$$T = T_{\text{пл}} + \frac{q_V}{2\lambda} (\delta^2 - y^2). \quad (4.7)$$

Найбільшою складовою тензора напружень є $\tau_{y\varphi}$, тобто напруження, що виникає на площині, перпендикулярній осі y і діє в напрямку φ , то інтенсивність дисипації q_V дорівнює

$$q_V = \tau_{y\varphi} \frac{\partial W_\varphi}{\partial y}. \quad (4.8)$$

Оскільки товщина плівки мала, то можна вважати, що швидкість W_φ змінюється приблизно лінійно, а її відносне значення змінюється від 0 до $V_\varphi/2$ (рис. 4.1,в). Вважаємо далі, що в межах елемента в'язкість розплаву μ постійна і визначається за швидкістю деформації $\dot{\gamma}_\varphi = \frac{\partial W_\varphi}{\partial y} = \frac{2\pi R n}{2\delta} = \frac{V_\varphi}{2\delta}$ і середньою температурою розплаву T_c у цьому елементі.

Тоді одержимо

$$\tau_{y\varphi} = \mu \frac{\partial W_\varphi}{\partial y}, \quad (4.9)$$

і

$$q_V = \mu \left(\frac{\partial W_\varphi}{\partial y} \right)^2 = \mu \left(\frac{V_\varphi}{2\delta} \right)^2. \quad (4.10)$$

Підставивши (4.10) у рівняння (4.7), одержимо

$$T = T_{\text{пл}} + \mu \left(\frac{V_\varphi}{2\delta} \right)^2 \frac{1}{2\lambda} (\delta^2 - y^2). \quad (4.11)$$

Середню температуру в плівці розплаву визначаємо так

$$T_C = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta T dy = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta \left[T_{\text{пл}} + \mu \left(\frac{V_\varphi}{2\delta} \right)^2 \frac{1}{2\lambda} (\delta^2 - y^2) \right] dy. \quad (4.12)$$

Після інтегрування одержимо

$$T_c = T_{пл} + \frac{\mu V_\phi^2}{12\lambda}. \quad (4.13)$$

Тепловий потік дисипації на поверхні плавлення до твердого полімеру дорівнює

$$q_{|y=\delta} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}_{|y=\delta} = q_V \delta = \frac{\mu V_\phi^2}{4\delta}. \quad (4.14)$$

Тоді сумарна потужність дисипації dN в об'ємі елемента з врахуванням того, що плівки розплаву утворюються біля поверхонь обох дисків, визначається так

$$dN = 2\mu \frac{V_\phi^2}{4\delta} 2\pi r dr = \frac{\mu V_\phi^2}{\delta} \pi r dr. \quad (4.15)$$

Ця потужність витрачається на нагрівання і плавлення полімеру, причому витрата розплаву, що при цьому утворюється в елементі dr , дорівнює

$$dG_p = \frac{dN}{i_{пл} - i_{вх}}, \quad (4.16)$$

де $i_{пл}$ та $i_{вх}$ – ентальпії полімеру при температурах плавлення і температурі $T_{вх}$ гранул, що надходять в екструдер. З іншої сторони, в умовах стаціонарності цей розплав «розтягується» диском, що обертається з середньою швидкістю $V_\phi/2$ у напрямку ϕ , тому для масової витрати можна написати вираз

$$dG_p = \rho \delta \frac{V_\phi}{4} dr. \quad (4.17)$$

Складаємо рівняння теплового балансу для поверхні плавлення

$$2\pi r dr q_{|y=\delta} = dG_p (i_{пл} - i_{вх}). \quad (4.18)$$

Підставляючи значення $q_{|y=\delta}$ із рівняння (4.14) і dG_p із рівняння (4.17), одержимо

$$2\pi r dr \frac{\mu V_\phi^2}{4\delta} = \rho \delta \frac{V_\phi}{4} dr (i_{пл} - i_{вх}), \quad (4.19)$$

звідки

$$\delta = \sqrt{\frac{2\pi r \mu V_\phi}{\rho (i_{пл} - i_{вх})}}. \quad (4.20)$$

Для області твердого полімеру і в зоні розплаву ($\delta \leq y \leq (H-\delta)$) перенос енергії описується рівнянням

$$\rho C W_r \frac{\partial T}{\partial r} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_V, \quad (4.21)$$

причому в зоні твердого полімеру інтенсивність дисипації $q_V=0$. Граничні умови для розв'язання рівняння такі:

$$- \text{для } r = D/2 \quad T = T_{\text{вх}}; \quad (4.22)$$

$$- \text{для } y = \delta \quad T = T_{\text{пл}}; \quad (4.23)$$

$$- \text{для } y = H-\delta \quad T = T_{\text{пл}}. \quad (4.24)$$

Складову швидкості W_r приблизно можна визначити з рівняння масової продуктивності в радіальному напрямку

$$W_r = \frac{G}{2\pi r \rho H}. \quad (4.25)$$

Розрахунок системи рівнянь числовими методами [5, 15, 29–32, 54, 59] та аналіз результатів показав, що для інженерних розрахунків внаслідок низької теплопровідності і малого часу перебування полімеру в зазорі зміною температури у твердому полімері можна знехтувати. Похибка при цьому не виходить за межі точності розрахунку й точності визначення теплофізичних і реологічних властивостей полімеру.

Алгоритм розрахунку системи рівнянь, що описують процес для виділеного елемента Δr у перехідній області, наведено на рис. 4.2. В алгоритмі передбачено два ітераційних цикли. У внутрішньому циклі (блоки 3–4) уточнюється товщина плівки розплаву, а в зовнішньому (блоки 2–6) – середня температура розплаву в цій плівці. Початковими наближеннями товщини плівки й середньої температури є значення цих величин, обчислені в попередньому модулі. Для розрахунку першого модуля перехідної області значення T_c приймається рівним середній температурі розплаву, що надходить з каналів гвинтової нарізки та обчислюється в останньому модулі плавлення, а значення товщини плівки задається. Ітераційний процес закінчується після досягнення заданої відносної похибки ε_0 . У блоці 7 визначаються сумарні значення масової витрати розплаву й потужності дисипації із врахуванням того, що плівки утворюються біля поверхонь обох дисків.

Розглянемо тепер процес в області розплаву. Теорія дискової екструзії розглядалась в ряді праць [3, 8–11, 16–18, 21, 38, 57, 68, 70, 72, 82, 85], базуючись передусім на використанні ефекту Вайссенберга із застосуванням відповідних реологічних рівнянь, які враховують в'язкопружні властивості поліме-

ру. Доведена як теоретично, так і експериментально висока якість змішування в дискових екструдерах, але продуктивність і тиск, які обумовлені ефектом Вайссенберга, невеликі. Розв'язання математичної моделі досить складне і для інженерних розрахунків його важко реалізувати через недостатню інформацією стосовно реологічних параметрів, які входять до розрахункових рівнянь.

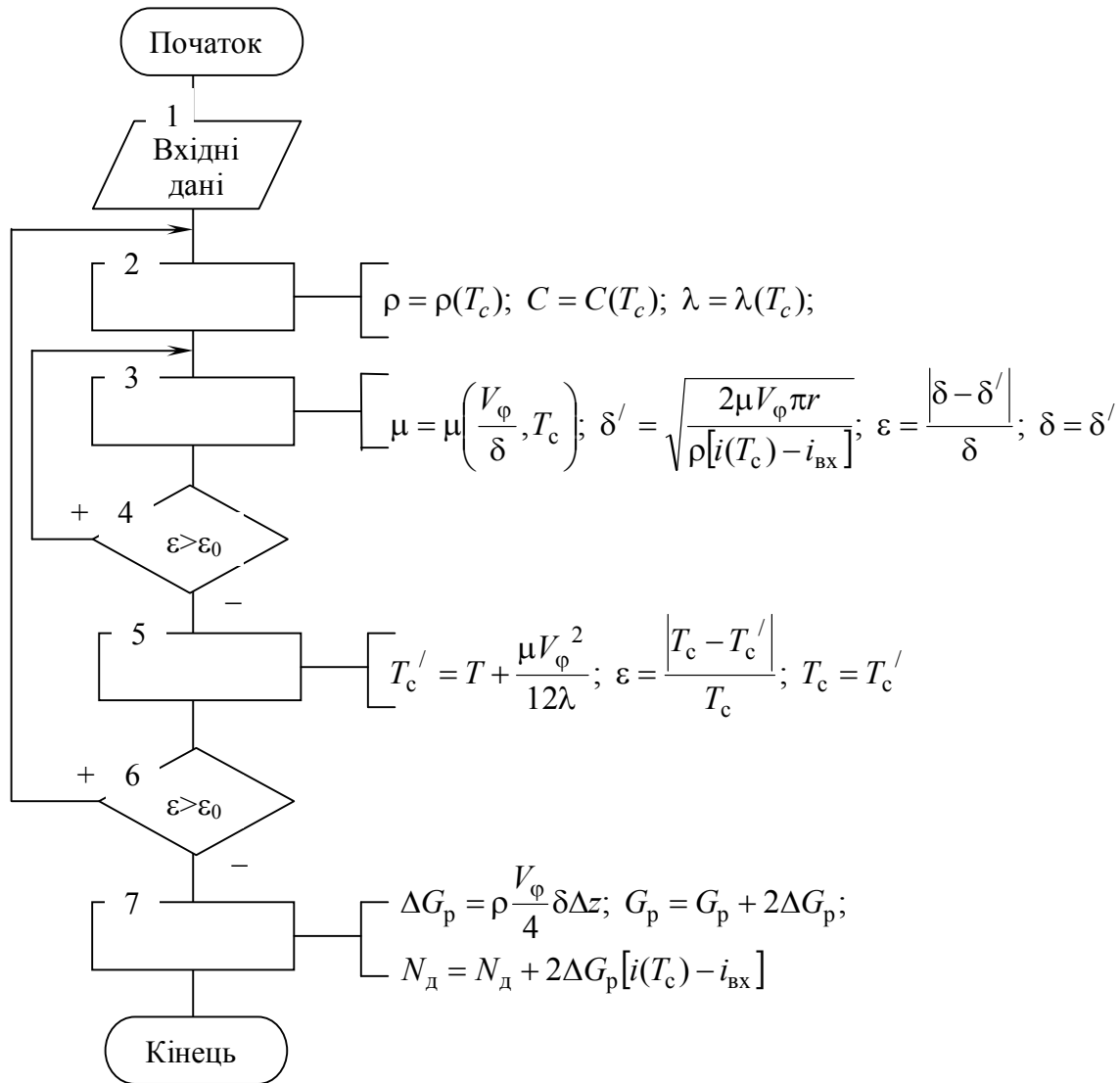


Рис. 4.2. Алгоритм розрахунку перехідної області

У випадку, що розглядається, гвинтова нарізка на поверхні диска забезпечує примусову течію в радіальному напрямі зазору, а вплив ефекту Вайссенберга на розрахунки суттєво зменшується, оскільки продуктивність крізь зазор між дисками значно перевищує продуктивність, обумовлену ефектом нормальних напружень. Тому під час побудови математичної моделі ефект Вайссенберга не враховуватимемо.

Розглянемо відповідно до методу ступеневої апроксимації елементарний об'єм елемента Δr . Як показав аналіз попередніх розрахунків, вирішальний вплив на потужність дисипації має складова лінійної швидкості V_ϕ , а радіальна складова швидкості в межах інженерних розрахунків майже не впливає на їхню точність і тому піз час визначення потужності дисипації нею можна знехтувати. Знехтуємо також силами інерції й тяжіння і вважатимемо, що рух розплаву здійснюється тільки під дією диска, що обертається.

Тоді рівняння руху в напрямку осі ϕ (див. рис. 4.1,в) має вигляд

$$\frac{\partial \tau_{y\phi}}{\partial y} = 0. \quad (4.26)$$

Інтегруючи це рівняння, одержимо

$$\tau_{y\phi} = \tau_0 = \text{const}. \quad (4.27)$$

Значення τ_0 залежить від реологічних властивостей розплаву і граничних умов:

$$\text{— для } y = 0 \quad W_\phi = 0; \quad (4.28)$$

$$\text{— для } y = H \quad W_\phi = V_\phi. \quad (4.29)$$

Запишемо в загальному вигляді реологічне рівняння

$$\tau_{y\phi} = \mu(\dot{\gamma}, T) \frac{\partial W_\phi}{\partial y} = \mu(\dot{\gamma}, T) \dot{\gamma}, \quad (4.30)$$

де $\mu(\dot{\gamma}, T)$ – в'язкість як функція швидкості зсуву й температури, Па·с [25].

Оскільки течія неізотермічна, а реологічне рівняння може бути апроксимовано різними функціями розв'яжемо систему рівнянь числовими методами, користуючись модифікованою схемою Горнера–Руфіні. Алгоритм розрахунку наведено на рис. 4.3.

У блоці 2 задаються початкове наближення τ_0 і крок розрахунку $\Delta \tau$, а в блоках 4–10 обчислюється значення швидкості зсуву у вузлових точках по координаті y з використанням заданого реологічного рівняння. Відповідні швидкості у вузлових точках визначаються в блоках 11–14, починаючи зі значення $W_0=0$ на поверхні нерухомого диска. За умови правильного вибору τ_0 значення швидкості W_T на поверхні обертового диска має дорівнювати V_ϕ . Тому в блоці 15 обчислюється відносна похибка i , якщо вона не перевищує заданої точності, розрахунок на цьому закінчується (блок 16). У іншому випадку за умови незмінного знаку абсолютної похибки блок 17 здійснює перехід до блоку 3 для продовження розрахунку з тим самим кроком. Якщо ж знак абсолютної похибки змінився, то в блоці 18 значення τ_0 зменшується на величину

$\Delta\tau$, крок розрахунку зменшується, і здійснюється перехід до блоку 3 для продовження пошуку до виконання умови, записаної в блоці 16.

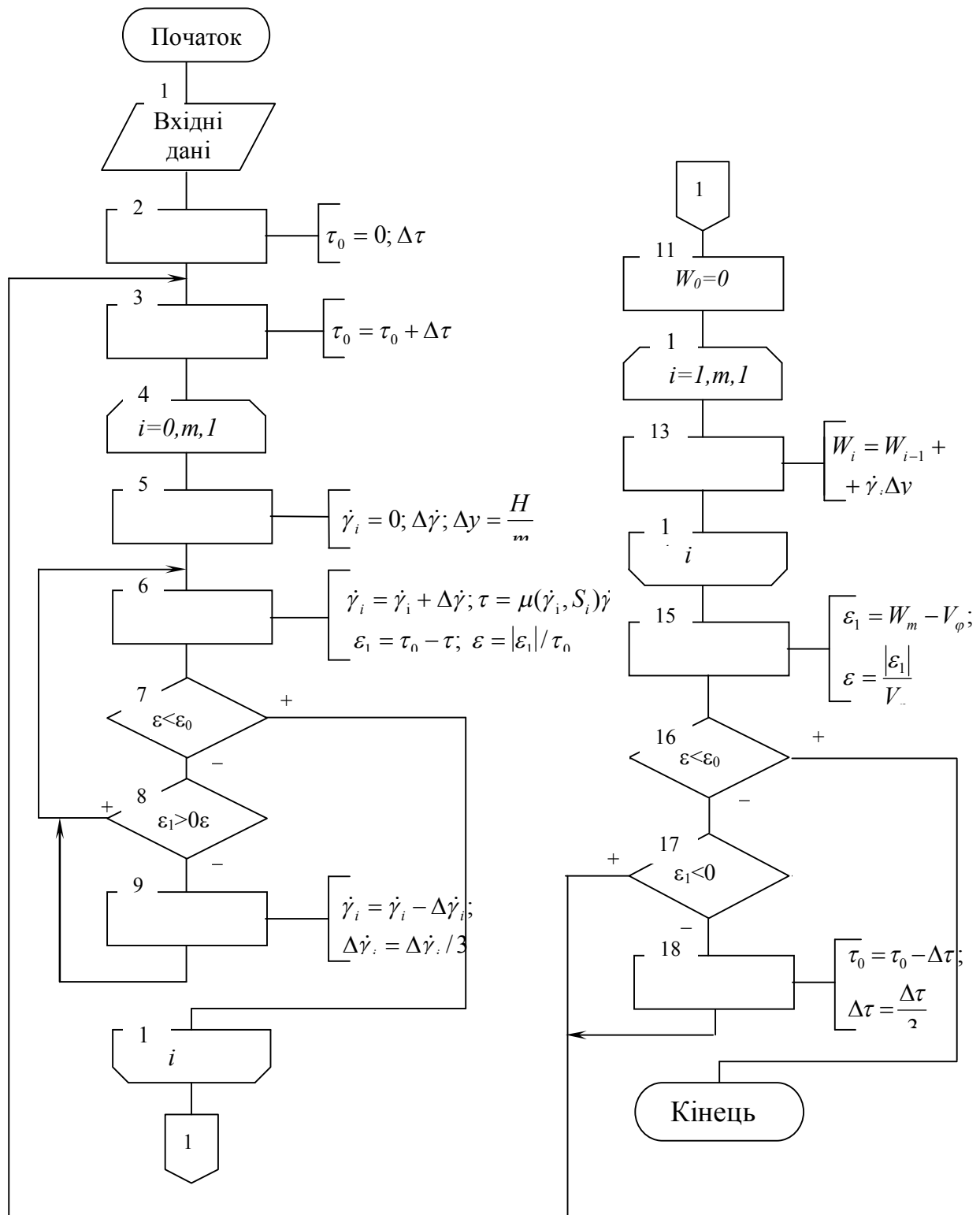


Рис. 4.3. Алгоритм розрахунку швидкісних полів

Для визначення температур у вузлових точках і потужності дисипації необхідно розв'язати рівняння (4.1) після його спрощення. Вважатимемо, що процес стаціонарний, а теплота дисипації переноситься тільки теплопровідністю по координаті y і конвекцією в радіальному напрямку. Тоді рівняння (4.1) набуває вигляду

$$\rho C W_r \frac{\partial T}{\partial r} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_v, \quad (4.31)$$

де потужність дисипації дорівнює

$$q_V = \tau_{y\varphi} \dot{\gamma} = \mu(\dot{\gamma}, T) \left(\frac{\partial W_\varphi}{\partial y} \right)^2. \quad (4.32)$$

Граничні умови мають вигляд:

$$\text{— для } y = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad (4.33)$$

$$\text{— для } y = H \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=H} = 0. \quad (4.34)$$

Теплофізичні властивості в рівнянні (4.31) є функціями температури, а швидкості зсуву у вузлових точках визначаються за алгоритмом, наведеним на рис. 4.3. Потрібно зазначити, що визначення радіальної швидкості W_r досить складна задача, оскільки для цього необхідно враховувати ефект Вайссенберга. У той же час на розподіл температур впливає також перемішування розплаву по висоті зазору (координаті y). Сукупність цих явищ має вплив на температурну неоднорідність розплаву, але, як показала оцінка, несуттєво впливає на середню температуру розплаву, оскільки інтенсивність дисипації визначається складовою швидкості обертання диска. Тому для інженерних розрахунків радіальну складову можна визначати за рівнянням для ньютонівської моделі рідини

$$W_r = \frac{3G}{\rho \pi r H^3} (Hy - y^2), \quad (4.35)$$

а поперечне перемішування врахуємо введенням коефіцієнта еквівалентної теплопровідності (коефіцієнта поперечного перемішування) в рівняння (4.31). Це дасть змогу оцінювати можливу температурну неоднорідність розплаву.

Оскільки рівняння (4.31) у разі його запису в кінцево-різницевого вигляді утворює тридіагональну матрицю, то для його розв'язання використаємо метод прогонки. Позначимо вузлові точки по координаті y індексом i , а по ко-

ординаті r відповідно індексом j . Коефіцієнти прямої прогонки P_i і Q_i у цьому разі визначимо за рівняннями, у яких для скорочення запису через S_i позначимо температури $T_{i,j}$ для j -го шару, а через T_i , відповідно, температури $T_{i,j+1}$ для $(j+1)$ -го шару по координаті r . Теплофізичні властивості у вузлових точках визначаються по температурі S_i , а потужність дисипації за формулою

$$q_{Vi} = \mu(\dot{\gamma}_i, S_i) \dot{\gamma}_i^2, \quad (4.36)$$

де швидкості зсуву знаходяться за наведеним на рис. 4.3 алгоритмом.

Тоді коефіцієнти прямої прогонки знайдемо за формулами:

– для $i=0$:

$$P_0 = \frac{-\frac{\lambda_0}{\Delta y}}{-\left(\frac{\lambda_0}{\Delta y} + \frac{\Delta y \rho_0 C_0 W_{r0}}{2\Delta r}\right)}; \quad (4.37)$$

$$Q_0 = \frac{-\left(\frac{\Delta y q_{V0}}{2} + \frac{\Delta y \rho_0 C_0 W_{r0} T_0}{2\Delta r}\right)}{-\left(\frac{\lambda_0}{\Delta y} + \frac{\Delta y \rho_0 C_0 W_{r0}}{2\Delta r}\right)}; \quad (4.38)$$

– для $0 < i < m$:

$$P_i = \frac{-\frac{\lambda_i}{\Delta Y^2}}{-\left(\frac{2\lambda_i}{\Delta Y^2} + \frac{\rho_i C_i W_R}{\Delta R} - \frac{\lambda_i P_{i-1}}{\Delta Y^2}\right)}; \quad (4.39)$$

$$Q_i = \frac{-\left(\frac{1}{\Delta Y^2 \lambda_i Q_{i-1}} + q_{Vi} + \frac{\rho_i C_i W_R T_i}{\Delta R}\right)}{-\left(\frac{2\lambda_i}{\Delta Y^2} + \frac{\rho_i C_i W_R}{\Delta R} - \frac{\lambda_i P_{i-1}}{\Delta Y^2}\right)}; \quad (4.40)$$

– для $i=m$:

$$P_m = \frac{-\frac{\lambda_m}{\Delta Y}}{-\left(\frac{\lambda_m}{\Delta Y} + \frac{\Delta Y \rho_m C_m W_R}{2\Delta R}\right)}; \quad (4.41)$$

$$Q_m = \frac{-\left(\frac{\Delta Y q_{Vm}}{2} + \frac{\Delta Y \rho_m C_m W_R T_m}{2\Delta R}\right)}{-\left(\frac{\lambda_m}{\Delta Y} + \frac{\Delta Y \rho_m C_m W_R}{2\Delta R}\right)}. \quad (4.42)$$

Зворотна прогонка здійснюється за формулами:

$$S_m = \frac{Q_{m-1}P_m + Q_m}{1 - P_{m-1}P_m}; \quad (4.43)$$

$$S_i = P_i S_{i+1} + Q_i. \quad (4.44)$$

Обчислення ведеться ітераційним методом до досягнення заданої точності. Алгоритм розрахунку температурних полів наведено на рис. 4.4.

У блоках 2–5 визначаються потужності дисипації q_{Vi} та її сумарне значення, швидкості W_{ri} і теплофізичні властивості у вузлових точках. Коефіцієнти прямої прогонки обчислюються в блоках 6–10, а зворотна прогонка з визначенням максимальної похибки здійснюється в блоках 11–18.

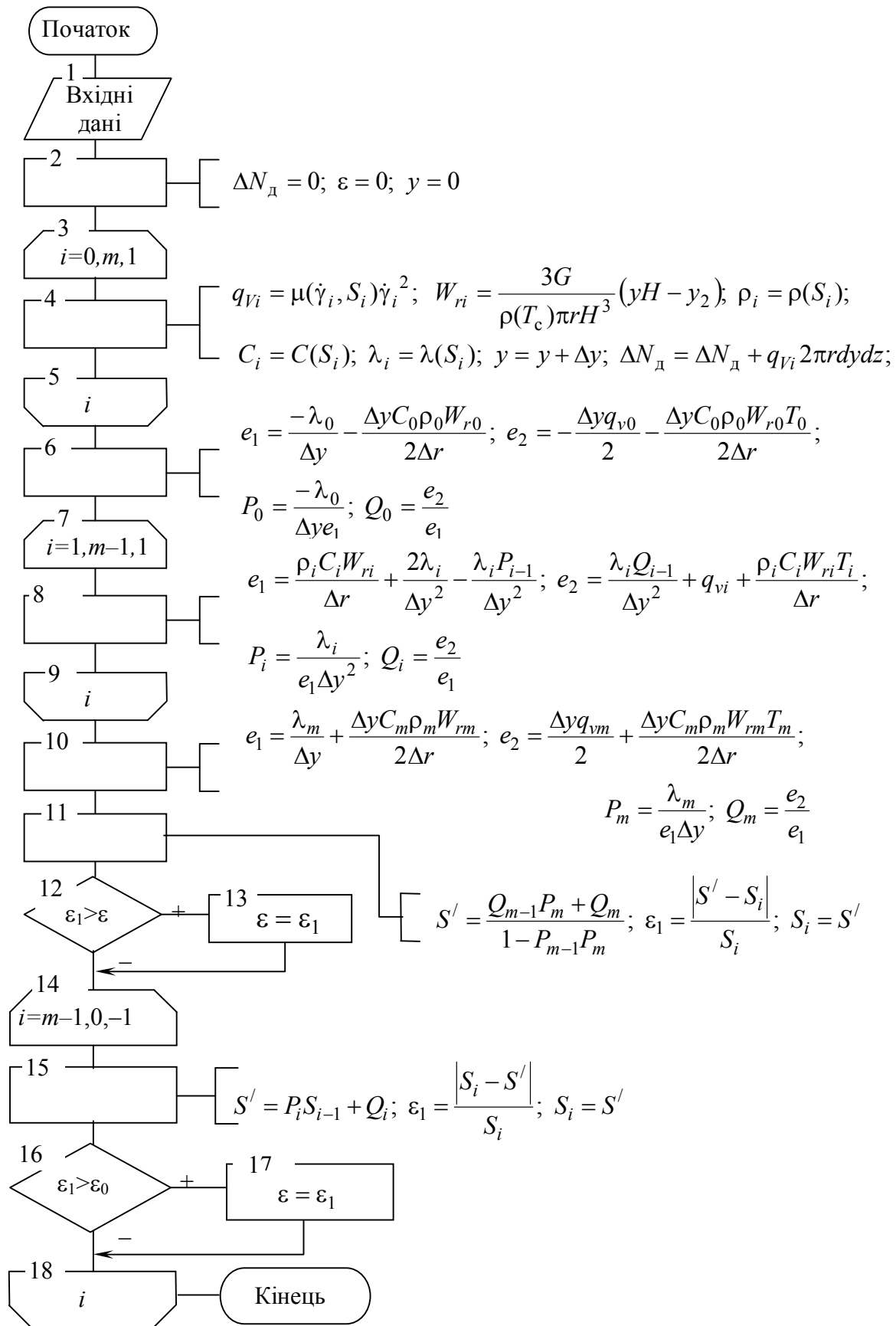


Рис. 4.4. Алгоритм розрахунку температурних полів

5. АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ДИСКОВОГО РОЗПЛАВЛЮВАЧА ТА ЙОГО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА

5.1. Алгоритм розрахунку дискового розплавлювача

Алгоритм розрахунку дискового розплавлювача наведено на рис. 5.1.

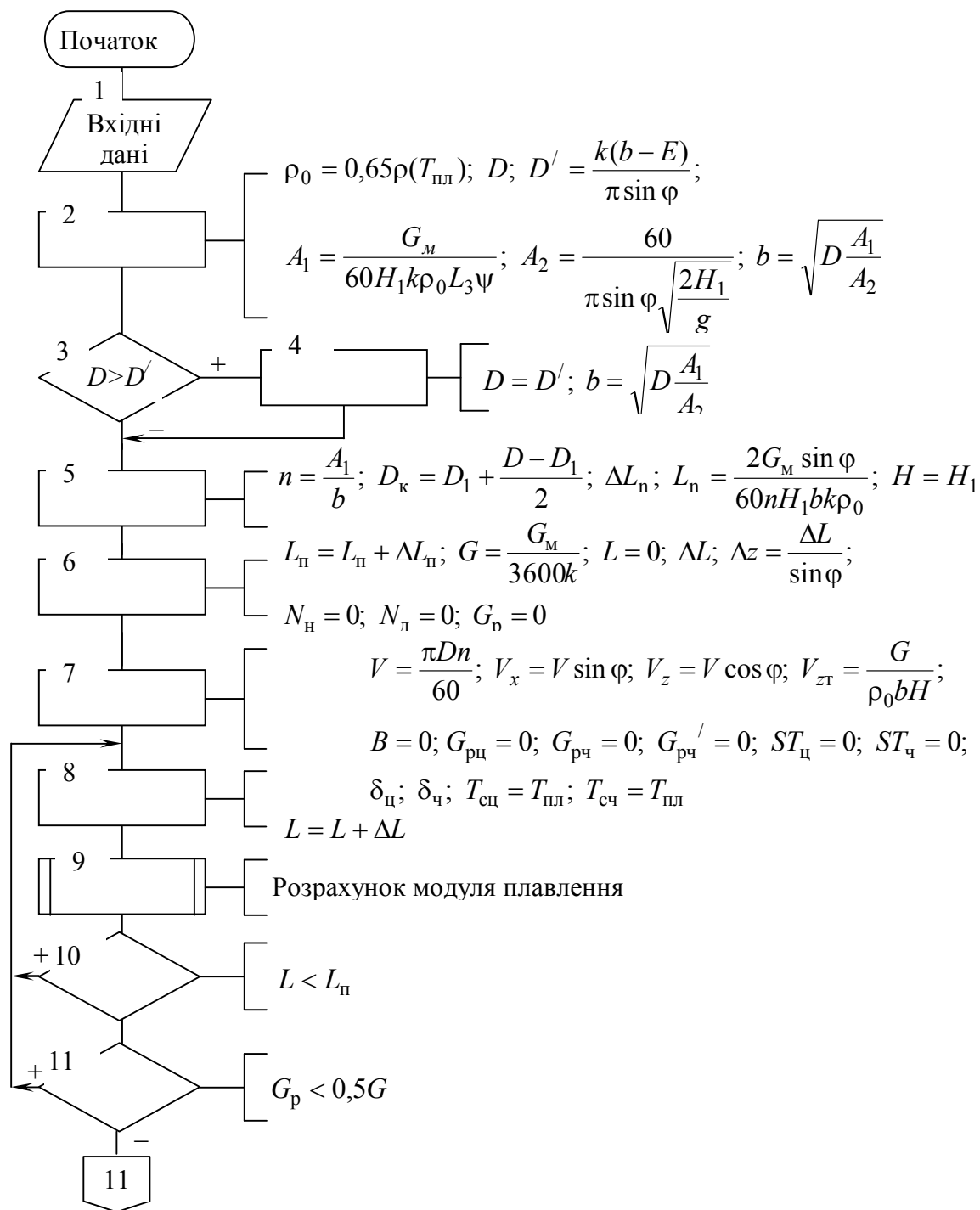


Рис. 5.1. Алгоритм розрахунку дискового розплавлювача

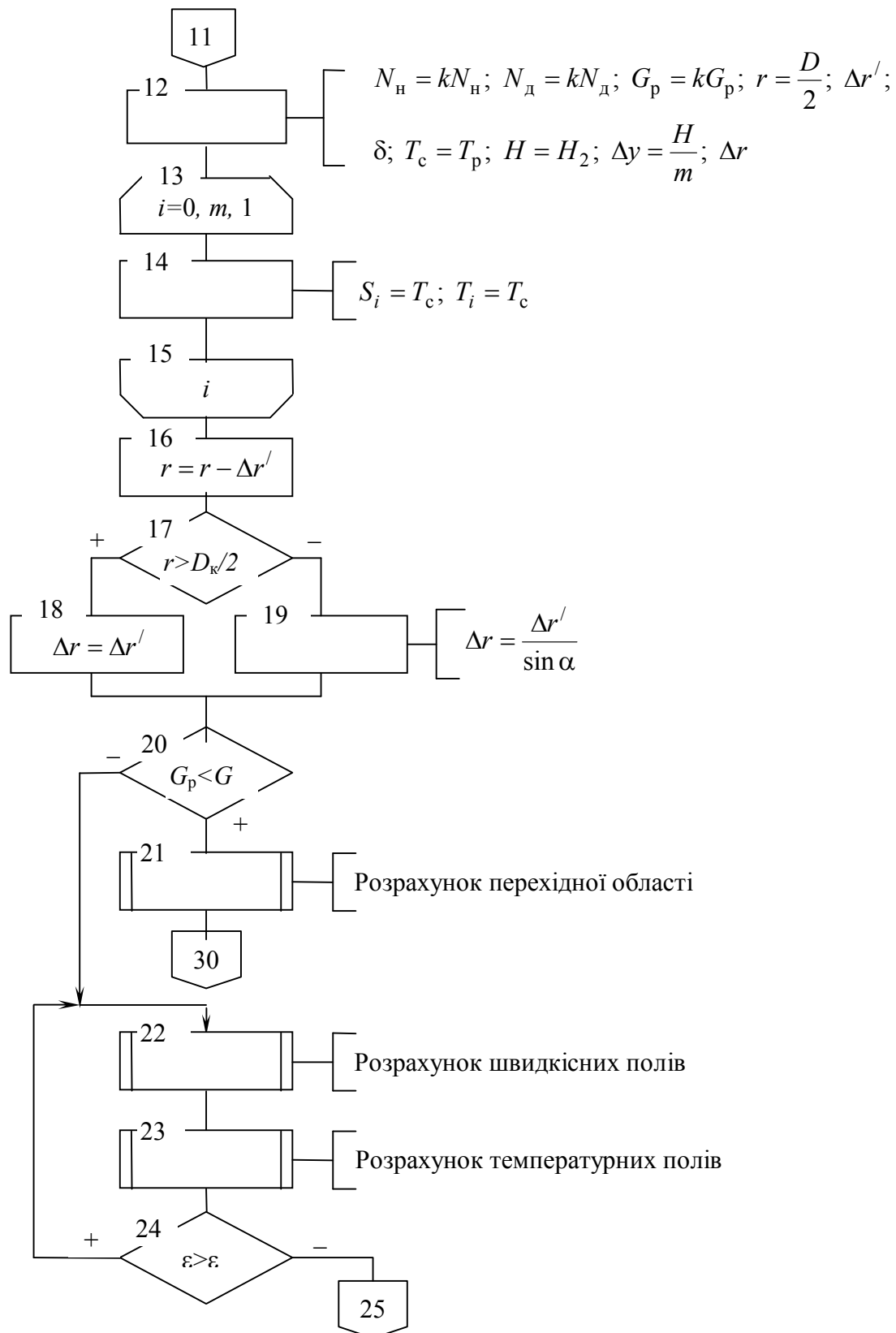


Рис. 5.1. Продовження. (Див. також с. 60)

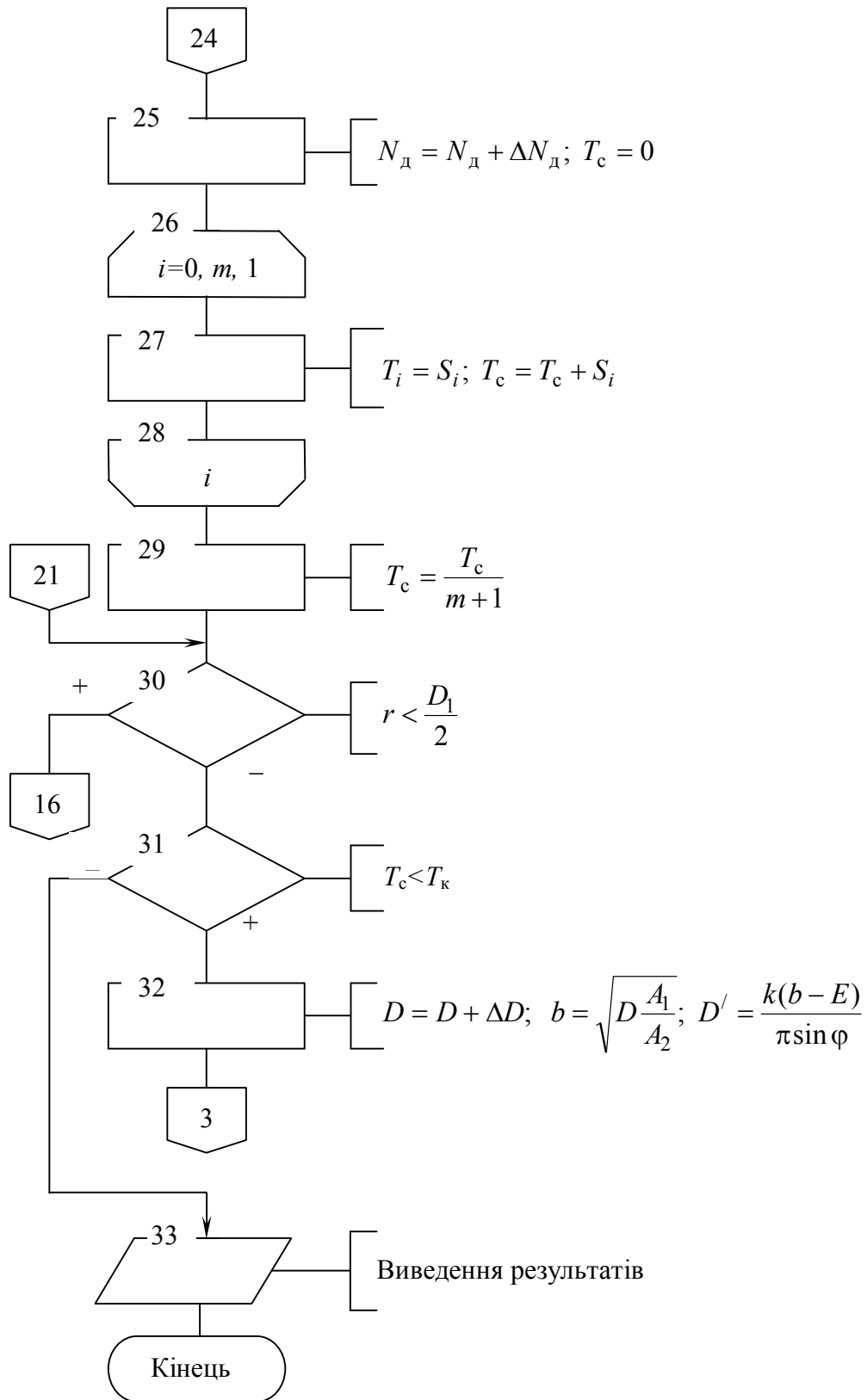


Рис. 5.1. Закінчення. (Див. також с. 60–61)

В алгоритмі передбачено пошук геометрії диска й частоти його обертання, що в сукупності забезпечують задане кінцеве значення температури розплаву T_k на виході з екструдера.

Для розрахунку вводяться такі початкові дані:

- масова продуктивність G , кг/год;
- глибина гвинтової нарізки H_1 , м;
- кут нахилу гвинтової нарізки φ , град.;
- ширина гребеня витка E , м;
- кількість заходів гвинтової нарізки κ ;
- довжина завантажувального отвору L_3 , м;
- величина зазору між дисками H_2 , м;
- діаметр вихідного отвору D_1 , м;
- кут конічної частини диска α , ...°;
- коефіцієнт заповнення ψ ;
- температура полімеру на вході в екструдер $T_{вх}$, °С;
- температура плавлення $T_{пл}$, °С;
- кінцева температура розплаву T_k , °С;
- масова ентальпія полімеру за температури входу $i_{вх}$, Дж/кг;
- теплофізичні властивості полімеру ρ , C , λ , i як функції температури [26, 55, 66, 67]: густина (кг/м³), масова теплоємність (Дж/(кг·К)), теплопровідність (Вт/(м·К)) та масова ентальпія (Дж/кг);
- функція, яка описує залежність в'язкості від швидкості зсуву і температури.

Ці початкові дані вводяться в блоці 1 алгоритму.

У подальшому, починаючи з мінімально можливого діаметра диска, який вибирається конструктивно і задається в блоці 2, в алгоритмі здійснюється обчислення кінцевої температури розплаву. Ця температура порівнюється з бажаною кінцевою температурою розплаву і, якщо обчислена температура менше від заданої, діаметр диска збільшується на величину ΔD і розрахунок повторюється.

Реалізація алгоритму для певного наближення діаметра диска починається з обчислення ширини каналу гвинтової нарізки диска й частоти його обертання, яке здійснюється в блоках 2–5. У блоці 5 крім цього також додатково обчислюється початкове наближення довжини зони плавлення в каналах нарізки L_n . Розрахунок процесу плавлення в каналах нарізки здійснюється в блоках 6–11, причому значення L_n у ході розрахунку вибирається таким, щоб співвідношення між витратою утвореного розплаву та продуктивністю було не менше від 0,6.

Розрахунок процесу в зазорі між дисками здійснюється в блоках 12–29. Для цього в блоках 12–15 визначаються сумарні значення потужностей нагрівників і дисипації, а також витрата розплаву, що надходить в зазор, і задають-

ся початкові значення змінних, необхідні для подальшого розрахунку. Профіль температур у вузлових точках беруть рівним температурі розплаву, що утворився в каналах нарізки (блоки 13–15). У блоках 16–19 визначається поточне значення радіуса обчислюваного елемента й відповідне значення кроку Δr із врахуванням наявності конусної частини диска. Якщо процес плавлення не закінчився, то в блоках 20 і 21 обчислення здійснюється за алгоритмом розрахунку перехідної області. В іншому випадку в блоках 22–29 розрахунок проводиться за формулами, одержаними для області розплаву, причому обчислення швидкісних і температурних полів здійснюється ітераційним методом доти, поки максимальне значення відносної похибки розрахунку температур не стане менше від заданого значення (блоки 22–24). У блоках 25–29 визначаються сумарна потужність дисипації, середня температура розплаву, а також здійснюється переіндексація температур, необхідна для розрахунку наступного елемента. Блок 30 порівнює поточне значення радіуса диска з радіусом вихідного отвору і здійснює перехід до блоку 16, якщо розрахунок не закінчився, Блок 31 порівнює обчислену середню температуру розплаву із заданим кінцевим значенням і, якщо останнє досягнуто, здійснює перехід до блоку 33 для виведення результатів розрахунку. В іншому разі діаметр диска збільшується на величину ΔD (блок 32) і розрахунок поновлюється, починаючи з блоку 3.

Потрібно зазначити, що в розробленому алгоритмі враховані уточнення математичних моделей і відповідні спрощення розрахункових залежностей, які здійснені з використанням проведених експериментальних досліджень і виконаного аналізу їхніх результатів. Програму розрахунку, побудовану за описаним алгоритмом, наведено в додатку А.

5.2. Експериментальні дослідження дискового розплавлювача

Базою для проведення експериментальних досліджень був дисковий розплавлювач ЕД-2 каскадної схеми, розроблений співробітниками Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» у співпраці (НТУУ «КПІ») з ПАТ «НВП „Більшовик”» та УкрНДІпластмаш (м. Київ) і встановлений у лабораторії кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв НТУУ «КПІ». У ході досліджень змінювалась геометрія дисків і режими роботи розплавлювача з метою встановлення відповідності математичних моделей реальному процесу і внесення коригувальних коефіцієнтів в алгоритм розрахунку розплавлювача. Докладно конструкція дискового розплавлювача описана в працях [11, 72]. Для досліджень використовувались диски діаметром 200 мм із чотири- та восьмизахідною нарізками завглибшки 6 мм і завширшки 22 і 18 мм, відповідно. Диск із восьмизахідною нарізкою був як однощільниної, так і двощільниної конструкції. Для порівняння

та аналізу використовувались також результати експериментальних досліджень, одержані для діаметра диска 160 мм із шестизахідною нарізкою за вглибшки 6 мм і завширшки 12 мм.

У ході експериментів змінювались частота обертання дисків, величина зазорів між дисками, продуктивність, яка визначалась частотою обертання за відсутності дозатора або продуктивністю дозатора за його наявності, а також температурні режими переробки. Порівняльний аналіз результатів експериментів з теоретичними розрахунками для випадку роботи з дозатором наведено в третьому розділі (див. рис. 3.2). Експерименти також показали, що найбільш стабільними є режими роботи, за яких у гвинтовій нарізці утворюється 50–60 % розплаву. Диск із полімером, одержаний для оптимального режиму після зупинки й витягування його з розплавлювача, наведено на рис. 5.1.

Криві 2 і 3 на рис. 3.2 одержані при роботі з диском, який мав восьмизахідну нарізку. Цей диск при відсутності дозованої подачі забезпечував більш високу продуктивність порівняно з диском з чотиризахідною нарізкою, що дозволило при роботі з дозатором визначити область оптимальних режимів, обмежену кривими 2 і 3 на рис. 3.2. Як уже зазначалось, за межами цих кривих спостерігались пульсації продуктивності й решти параметрів.



Рис. 5.1. Диск розплавлювача з полімером

За розробленим алгоритмом на рис. 5.2 і 5.3 наведено розраховані криві залежності продуктивності від частоти обертання й потужності від продуктивності. Також на них нанесено експериментальні дані, одержані за виконання умов оптимальності. Як видно із рис. 5.2 і 5.3, експериментальні дані з достатньою точністю узгоджуються з теоретичними розрахунками.

Результати теоретичних розрахунків співставляли з експериментальними даними, одержаними для процесу перероблення поліетиленів марок 15303-003, 20303-003, поліпропілену марки 02П10/003, полістиролу, а також полімерів, наповнених скловолокном, абразивом, барвниками та ін. Розбіжність експериментальних і розрахункових даних не перевищувала 17 %.

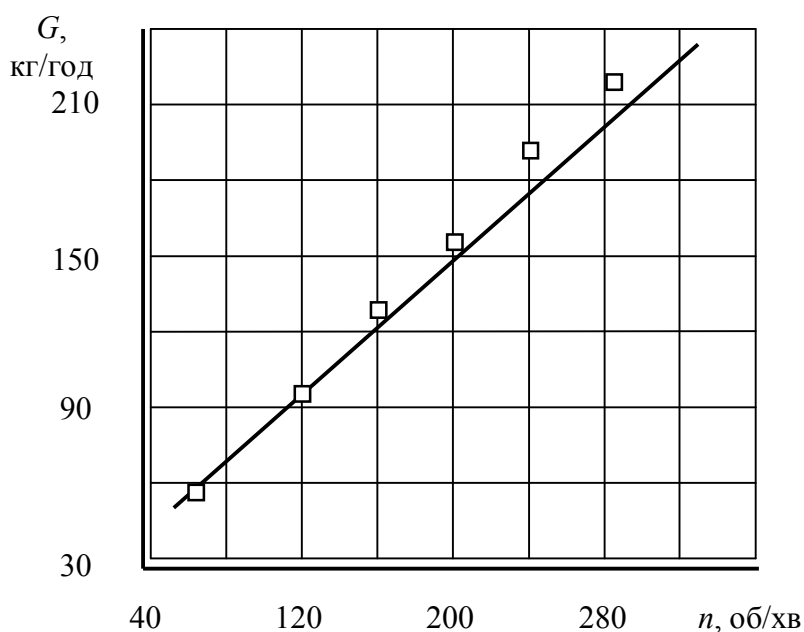


Рис. 5.2. Залежність продуктивності розплавлювача від частоти обертання диска

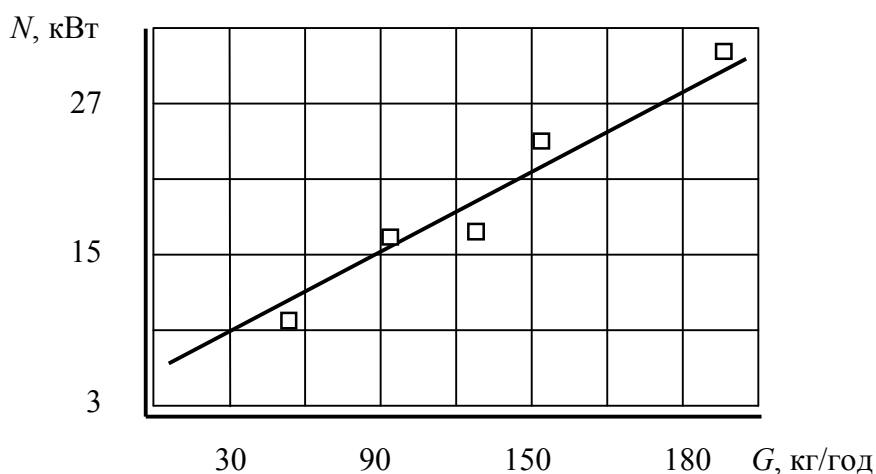


Рис. 5.3. Залежність потужності приводу від продуктивності розплавлювача

Отже, розроблений алгоритм проектного розрахунку дискового розплавлявача дає змогу для певної продуктивності й температури розплаву на виході з екструдера визначати основні необхідні для конструювання величини: діаметр диска, мінімальну ширину гвинтової нарізки, частоту обертання диска, мінімально необхідну потужність приводу, а також оцінювати можливу температурну неоднорідність розплаву.

6. УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ДИСКОВИХ І ЧЕРВ'ЯЧНО-ДИСКОВИХ ЕКСТРУДЕРІВ

6.1. Діскові екструдери

Останніми роками було розроблено багато нових конструкцій екструдійного обладнання з робочими органами у вигляді дисків – передусім рухомого й нерухомого.

Так, запропоновано дисковий екструдер, у якому нове виконання його робочих органів підвищує продуктивність машини, а також зменшує осьові навантаження на вал і, як наслідок, – матеріалоемність машини [39].

Пропонований екструдер містить корпус 1 із основним 2 і додатковим 3 завантажувальними отворами, закріплені на валу 4 основний 5 і додатковий 6 диски з робочими торцевими поверхнями 7 і 8, оберненими одна до одної, співвісний з валом 4 канал 9 для виходу розплаву і сполучений з каналом 9 випускний отвір 10, розташований між дисками 5 і 6 (рис. 6.1). При цьому діаметр d вала 4 менше від діаметра D каналу 9 для виходу розплаву, а з боку кожного диска 5 і 6 вал 4 може бути споряджений різноспрямованими гвинтовими нарізками 11 і 12.

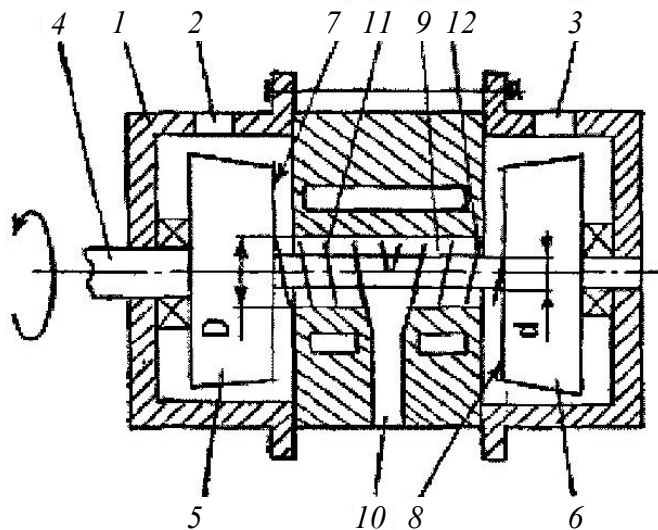


Рис. 6.1. Конструкції дискового екструдера з двома парами дисків (пат. України № 6506 U [39]): 1 – корпус; 2, 3 – основний і додатковий завантажувальні отвори, відповідно; 4 – вал; 5, 6 – основний і додатковий диски з робочими торцевими поверхнями 7 і 8, відповідно; 9 – канал; 10 – випускний отвір; 11, 12 – різноспрямованими гвинтовими нарізками

Екструдер працює в такий спосіб.

Гранульований термопластичний матеріал подають у завантажувальні отвори 2 і 3, після яких він потрапляє в проміжок між корпусом 1 і відповідним диском 5 і 6, плавиться у робочих проміжках з боку відповідної торцевої поверхні 7 і 8 і надходить у кільцевий канал 9 для виходу розплаву. У зазна-

ченому каналі обидва потоки змішуються і крізь випускний отвір 10 далі потрапляють у формувальну або гранулювальну головку.

За наявності на валу 4 різноспрямованих гвинтових нарізок 11 і 12 підготовлений розплав потрапляє в головку за більшого тиску, що значно розширює технологічні можливості екструдера.

А в разі приготування композиційних матеріалів розплав полімеру можна отримувати з боку одного з дисків (5 або 6), а, наприклад, наповнювач подавати з боку другого диска (6 або 5, відповідно). Крім того, утворені за допомогою вала 4 і різноспрямованих гвинтових нарізок 11 і 12 своєрідні шнеки виконують роль дозувального пристрою на виході екструдера.

Пропонована конструкція істотно розширює технологічні можливості екструдера при невеликій його матеріалоемності.

У патенті [40] запропоновано дисковий екструдер, у якому унеможливується проникнення перероблюваного матеріалу в проміжок між сполучними конічними ділянками циліндричної втулки та диска, які обертаються одна відносно одного, а отже і підвищується надійність екструдера

Дисковий екструдер містить корпус 1 із завантажувальним 2 і розвантажувальним 3 отворами, а також співвісно встановлені з можливістю обертання порожнисту циліндричну втулку 4 з гвинтовою нарізкою 5 на її зовнішній поверхні 6 і диск 7 (рис. 6.2). Сполучені поверхні 8 і 9 циліндричної втулки 4 і диска 7 виконано у вигляді зрізаних конусів з меншою основою 10 з боку розвантажувального отвору 3 корпусу 1. Порожниста циліндрична втулка 4 і диск 7 можуть бути встановлені з можливістю відносного осьового переміщення.

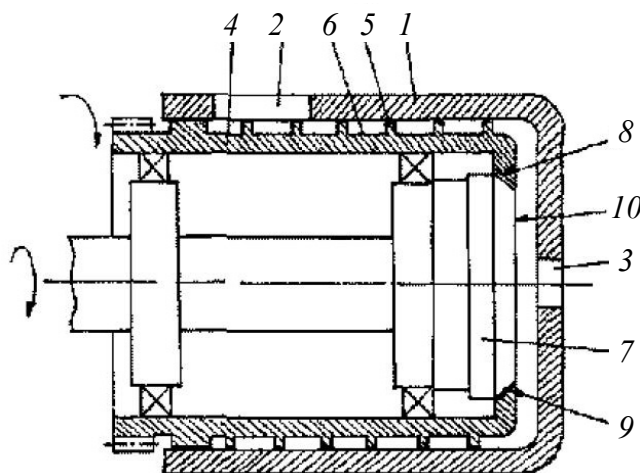


Рис. 6.2. Конструкції дискового екструдера зі складеним обертовим диском (пат. України № 7449 U [40]): 1 – корпус; 2, 3 – завантажувальний і розвантажувальний отвори, відповідно; 4 – порожниста циліндрична втулка; 5 – гвинтова нарізка; 6 – зовнішня поверхня втулки; 7 – диск; 8, 9 – сполучені поверхні втулки й диска, відповідно; 10 – менша основа втулки

Екструдер працює в такий спосіб.

Вихідну полімерну сировину подають у завантажувальний отвір 2, після чого вона захоплюється гвинтовою нарізкою 5 циліндричної втулки 4 і надходить у проміжок між корпусом 1 і диском 7, плавиться і у вигляді розплаву виходить крізь розвантажувальний отвір 3. Виникнення при цьому в кільцевому проміжку між сполучними поверхнями 8 і 9 циліндричної втулки 4 і диска 7 нормальних напружень в розплаві (ефекту Вайссенберга) сприяє руху матеріалу не в порожнину циліндричної втулки 4, а в дисковий проміжок, утворений диском 7 і корпусом 1 екструдера.

За потреби зміни величини гідравлічного опору зазначеного кільцевого проміжку або (та) умов перероблення полімеру в проміжку між диском 7 і корпусом 1 регулюють взаємне положення циліндричної втулки 4 і диска 7.

Дисковий екструдер відповідно до патенту [41] забезпечує можливість стабілізації його роботи за рахунок узгодження режимів обох дискових проміжків під час перероблення найрізноманітніших полімерних матеріалів.

Дисковий екструдер містить корпус 1 із завантажувальним 2 і розвантажувальним 3 отворами, зовнішній 4 і внутрішній 5 диски, між якими встановлено обертовий диск 6 з циліндричною стінкою 7, що має зовнішню 8 і внутрішню 9 гвинтові нарізки, і днищем 10 (рис. 6.3). Днище 10 утворює два дискових проміжки 11 і 12 із зовнішнім 4 і внутрішнім 5 дисками, при цьому зовнішній диск 4 на ділянці завантажувального отвору 2 корпусу 1 споряджений щонайменше одним вхідним отвором 13. Внутрішній 5 та обертовий 6 диски виконано з осьовими отворами 14 і 15 відповідно, у яких з можливістю поздовжнього переміщення розміщено стакан 16 з отворами 17 на бічній стінці 18, при цьому відкрита частина 19 стакану 16 направлена в бік розвантажувального отвору 3 корпусу 1.

Стакан може бути охоплено рухомою трубкою 20, яку виконано рухомою вздовж осі 21 стакану 16 (рис. 6.3,б) або перфорованою і з можливістю повороту відносно осі 21 стакану 16 (рис. 6.3,в).

Гранульований або порошкоподібний термопластичний матеріал подають у завантажувальний отвір 2, після чого він захоплюється гвинтовими нарізками 8 і 9 циліндричної стінки 7 обертового диска 6 і, розігрівуючись за рахунок електронагрівників (не показані) і тертя об зовнішній 4 і внутрішній 5 диски, надходить у дискові проміжки 11 і 12, плавиться і у вигляді розплаву виходить крізь розвантажувальний отвір 3 корпусу 1.

Залежно від властивостей перероблюваного матеріалу та режиму роботи зміною положення стакану 16 відносно внутрішнього 5 та обертового 6 дисків забезпечується регульоване перекриття вихідних ділянок дискових проміжків 11 і 12, а отже і опір кожного із зазначених проміжків, що дозволяє забезпечити узгодження режимів обох дискових проміжків 11 та 12 і стабільність роботи екструдера в цілому.

Якщо отвори 17 стакану 16 виконані витягнутими вздовж осі стакану 17 (наприклад, у формі щілин), то під час регулювання його положення буде змінюватися лише опір дискового проміжку 11; якщо довжина стакану 16 не перевищує товщини обертового диска 6, а отвори 17 виконані діаметром меншим від величини дискового проміжку 12, то під час регулювання положення стакану 16 змінюватиметься лише опір дискового проміжку 12. Таким чином, зміною конструктивного оформлення стакану 16 можна регулювати опір одного з дискових проміжків (11 чи 12) або обох дискових проміжків (11 і 12) одночасно.

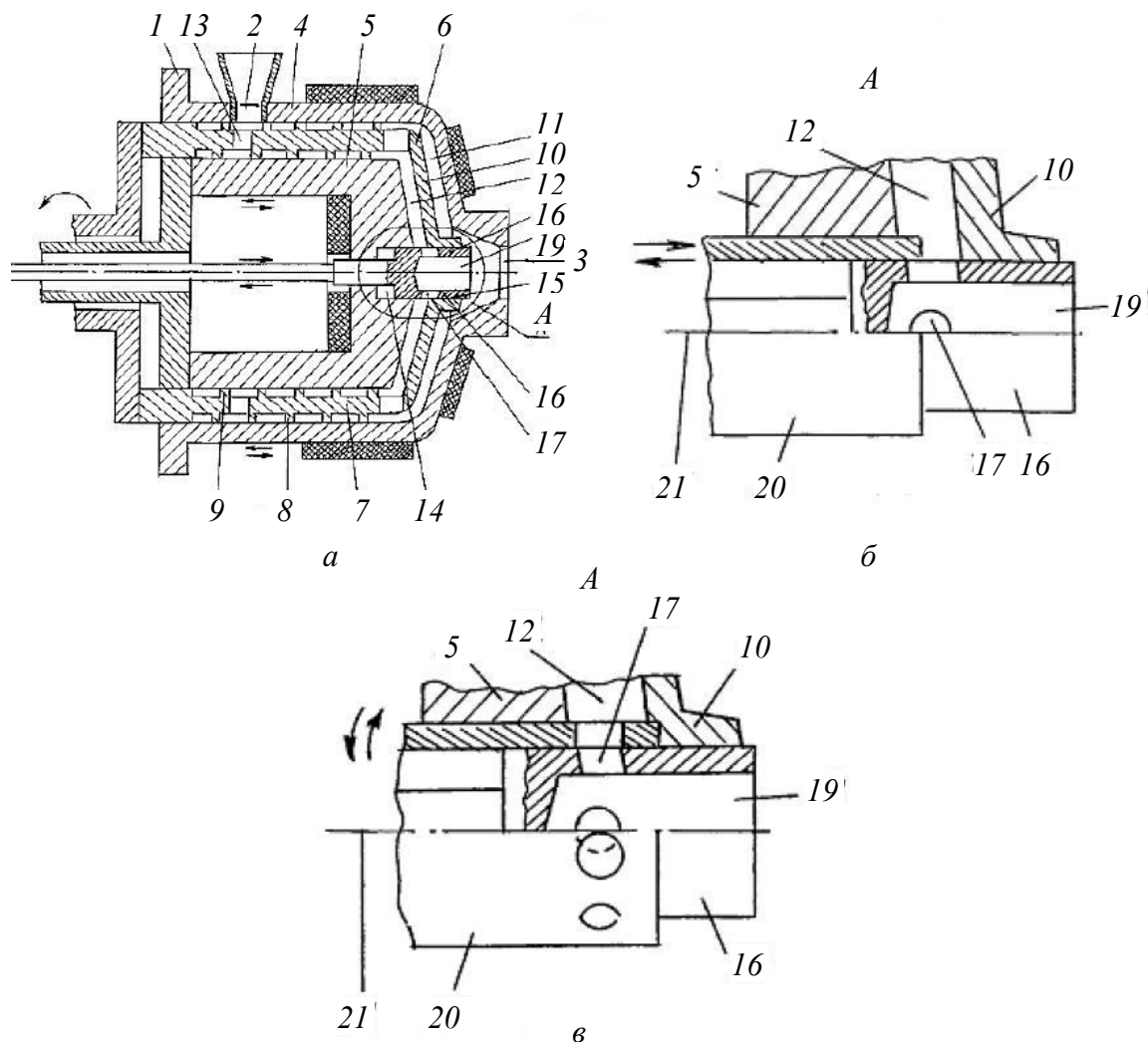


Рис. 6.3. Конструкції дискового екструдера зі складеним обертовим диском (пат. України № 14499 U [41]): а – загальна будова екструдера; б, в – приклади виконання виносного елемента А; 1 – корпус; 2, 3 – завантажувальний і розвантажувальний отвори, відповідно; 4, 5 – зовнішній і внутрішній диски, відповідно; 6 – обертовий диск; 7 – циліндрична стінка; 8, 9 – зовнішня та внутрішня гвинтові нарізки, відповідно; 10 – днище; 11, 12 – дискові проміжки; 13 – вхідний отвір; 14, 15 – осьові отвори; 16 – стакан; 17 – отвори; 18 – бічна стінка; 19 – відкрита частина стакану; 20 – рухома трубка; 21 – вісь стакану

У разі, коли стакан охоплено рухомою трубкою 19, яку виконано рухомою вздовж осі 21 стакана 16 (див. рис. 6.3,а) або перфорованою і з можливістю повороту відносно осі 21 стакана 16 (див. рис. 6.3,б), то необхідного ступеня перекриття нею отворів 17 стакана 16 досягають переміщенням трубки (див. рис. 6.3,а) або поворотом на певний кут ділянок стінки трубки 20, вільних від перфорації (див. рис. 6.3,б). При цьому досягається можливість незалежного регулювання опору в обох дискових проміжках 11 і 12.

У патенті [46] запропоновано дисковий екструдер, у якому забезпечується активна дія на процес подавання вихідної сировини в дисковий екструдер, що забезпечує відсутність пульсацій розплаву та його перегрів на виході з екструдера (рис. 6.4).

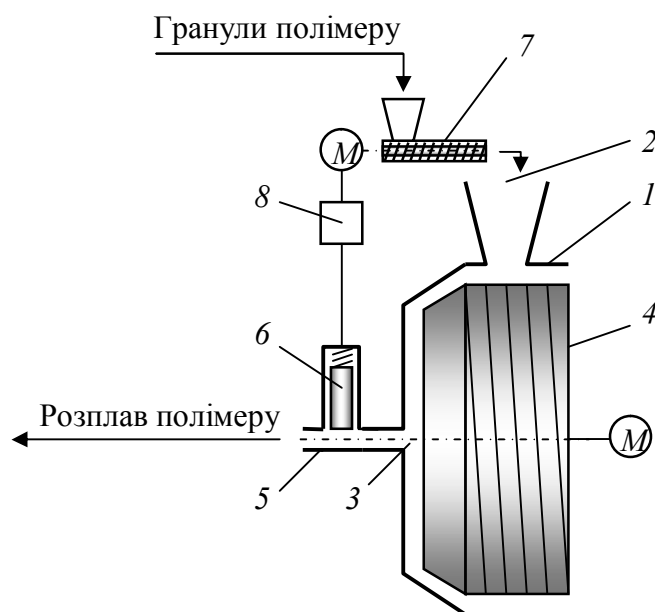


Рис. 6.4. Конструкції дискового екструдера зі складеним обертовим диском (пат. України № 44266 U [46]): 1 – корпус; 2, 3 – завантажувальний і розвантажувальний отвори, відповідно; 4 – обертовий диск; 5 – розплавопровід; 6 – компенсувальний елемент; 7 – дозатор сировини; 8 – регулятором продуктивності дозатора

Дисковий екструдер містить корпус 1 із завантажувальним 2 і розвантажувальним 3 отворами і змонтованим у ньому з можливістю обертання диском 4, розміщений на виході з розвантажувального отвору 3 розплавопровід 5, а також компенсувальний елемент 6, установлений у розплавопроводі і виконаний у вигляді підпружиненого плунжера. Екструдер споряджено дозатором сировини 7, встановленим на вході у завантажувальний отвір 2, а компенсувальний елемент з'єднано з регулятором продуктивності 8 дозатора 7.

Матеріал, що підлягає переробленню, надходить у завантажувальний отвір 2 корпусу 1, де захоплюється нарізкою диска 4 і далі транспортується ним у напрямку до розвантажувального отвору 3. Залежно від зміни опору ек-

струзійної головки (не показано) сигнал від компенсувального елемента 6 надходить до регулятора продуктивності дозатора 7, який забезпечує зниження або підвищення подавання вихідної сировини в екструдер і таким чином – його надійну роботу.

У патенті [48] запропоновано певну модернізацію попередньої конструкції, а саме дисковий екструдер, який забезпечує активний вплив на температуру перероблюваного матеріалу, а отже і на показники якості одержуваної продукції (рис. 6.5).

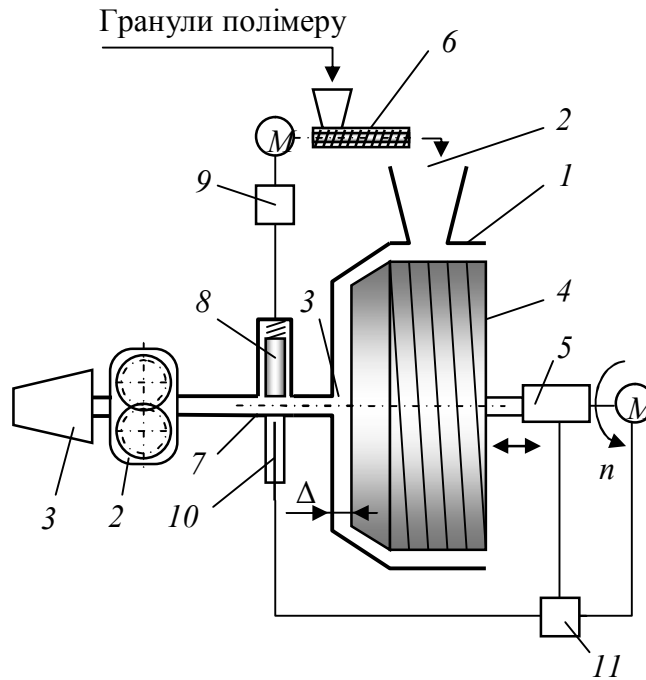


Рис. 6.5. Конструкції дискового екструдера зі складеним обертовим диском (пат. України № 60000 U [48]): 1 – корпус; 2, 3 – завантажувальний і розвантажувальний отвори, відповідно; 4 – обертовий диск; 5 – механізм регулювання величини дискового проміжку; 6 – дозатор сировини; 7 – розплавопровід; 8 – компенсувальний елемент; 9 – регулятором продуктивності дозатора; 10 – датчик температури; 11 – регулятор частоти обертання диска; 12 – шестеренний насос; 13 – екструзійна головка

Дисковий екструдер містить корпус 1 із завантажувальним 2 і розвантажувальним 3 отворами і змонтованим у ньому з можливістю обертання диском 4, механізм 5 регулювання величини дискового проміжку Δ між корпусом 1 і диском 4, установлений на вході у завантажувальний отвір 2 дозатор сировини 6, розміщений на виході з розвантажувального отвору розплавопровід 7, споряджений компенсувальним елементом 8, виконаним у вигляді підпружиненого плунжера і з'єднаним з регулятором продуктивності 9 дозатора 6, при цьому розплавопровід 7 також споряджено датчиком температури 10, з'єднаним з регулятором 11 частоти обертання n диска 4 і величини дискового проміжку Δ між корпусом 4 і диском 1. Екструдер також може бути споряджено шестеренним насосом 12 та екструзійною головкою 13.

Матеріал, що підлягає переробленню, надходить у завантажувальний отвір 2 корпусу 1, де захоплюється нарізкою диска 4 і далі транспортується ним у напрямку до розвантажувального отвору 3. Залежно від зміни опору на виході з екструдера сигнал від компенсувального елемента 8 надходить до регулятора 9 продуктивності дозатора 6, який забезпечує зниження або підвищення подавання вихідної сировини в екструдер і таким чином – його стабільну продуктивність.

Регулювання же температури перероблюваного матеріалу, а отже і якість екструдованої продукції, відбувається в такий спосіб. У разі необхідності підвищення температури попереднє (грубе) її регулювання регулятор 11 забезпечує зміною величини дискового проміжку Δ між корпусом 1 і диском 4, а остаточне (тонке) регулювання – зміною частоти обертання диска 4 (зменшення дискового проміжку Δ і збільшення частоти n обертання диска 4 приводить до підвищення температури).

У патенті [49] запропоновано модернізацію екструдера відповідно до патенту України № 44266 U [46]. Розроблена конструкція забезпечує врахування інтегральної зміни температури розплаву, який надходить до формувальної головки на всіх ділянках, що забезпечує потрібний рівень температури на вході у формувальний пристрій. Модернізація конструкції полягає в тому, що розплавопровід на виході з шестеренного насоса споряджено додатковим датчиком температури, з'єднаним з регулятором частоти обертання диска й величини дискового зазору між корпусом і диском.

У патенті [51] також запропоновано модернізацію екструдера відповідно до патенту України № 44266 U [46]. Модернізація конструкції полягає в тому, що екструдер споряджено додатковим шестеренним насосом для повертання частини розплаву в початкову зону плавлення дискового екструдера. Розроблена конструкція забезпечує реалізацію в екструдері дисперсійну модель плавлення, коли частинки вихідної сировини з усіх боків оточені розплавом, що сприяє більш інтенсивному плавленню вихідної полімерної сировини.

У патенті [50] запропоновано в межах основної нарізки на циліндричній частині обертового диска виконувати додаткову нарізку, яка сприяє більш інтенсивному плавленню вихідної полімерної сировини (за аналогією з «бар'єрною» нарізкою черв'яків черв'ячних екструдерів).

У патенті [52] описано дисковий екструдер, у якому нове виконання розплавопроводу забезпечує ефективне подавання частини розплаву з виходу із розвантажувального отвору в потрібне місце робочого каналу ділянки циліндричної частини диска залежно від перероблюваного матеріалу й режиму роботи екструдера, а отже розширює технологічні можливості екструдера (рис. 6.6).

Дисковий екструдер містить корпус 1 із завантажувальним 2 і розвантажувальним 3 отворами і змонтованим у ньому з можливістю обертання диском 4 з торцевою частиною 5 і спорядженою гвинтовою нарізкою циліндричною частиною 6, утворений зазначеними частинами 5 і 6 диска 4 та корпусом 1 робочий канал 7, а також розміщений на виході з розвантажувального отвору 3 розплавопровід 8, сполучений з робочим каналом 7 на ділянці циліндричної частини 6 диска 1, при цьому розплавопровід 8 додатково споряджено розподільником розплаву 9 вздовж робочого каналу 7 на ділянці циліндричної частини 6 диска 1, виконаний, наприклад, у вигляді сукупності болтів 10 для перекриття отворів 11 у корпусі 1. Розплавопровід 8 може бути споряджено шестеренним насосом 12. Також для підвищення тиску розплаву під час його руху крізь екструзійну головку 13 екструдер може бути споряджено шестеренним насосом 14.

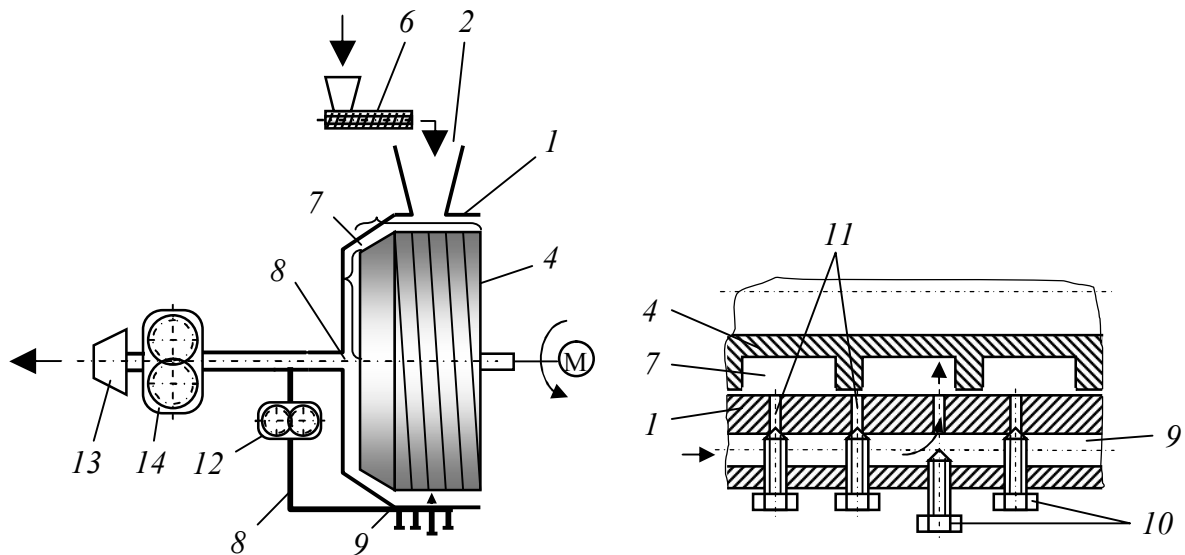


Рис. 6.6. Конструкції дискового екструдера зі складеним обертовим диском (пат. України № 97551 U [52]): 1 – корпус; 2, 3 – завантажувальний і розвантажувальний отвори, відповідно; 4 – обертовий диск; 5, 6 – торцева й циліндрична частина частини обертового диска, відповідно; 7 – робочий канал; 8 – розплавопровід; 9 – розподільник розплаву; 10 – запірні болти; 11 – отвори; 12, 14 – шестеренні насоси; 13 – екструзійна головка

Вихідний твердий полімерний матеріал надходить у завантажувальний отвір 2 корпусу 3, де захоплюється нарізкою циліндричної частини 6 диска 4 і далі транспортується ним у напрямку до його торцевої частини 5, де відбувається інтенсивне плавлення полімеру й гомогенізація утворюваного розплаву. Далі розплав рухається до розвантажувального отвору 3 корпусу 1. Внаслідок наявності в розплавопроводі 8 розподільника розплаву 9 частина розплаву надходить у робочий канал 7 на ділянці циліндричної частини 6 диска 1, у якій розплав, розподіляючись між частинками твердої сировини, сприяє їх інтен-

сивному плавленню. При цьому подавання частини розплаву забезпечується в потрібне місце робочого каналу 7 на ділянці циліндричної частини 6 диска 1 залежно від виду перероблюваного матеріалу й режиму роботи екструдера (за рахунок викручування та вгвинчування відповідних болтів 10, що дає змогу відкривати та перекривати потрібні отвори 11 у корпусі 1). Наявність шестеренного насоса 12 забезпечує надійний рух розплаву крізь розплавопровід 8 за будь-яких значень тиску в технологічних зонах екструдера, що забезпечує його безперебійну й надійну роботу.

6.2. Черв'ячно-дискові та черв'ячно-дисково-черв'ячні екструдери

На відміну від «чисто» дискових екструдерів більш поширеними є черв'ячно-дискові (рідше черв'ячно-дисково-черв'ячні) екструдери.

У патенті [47] запропоновано конструкцію черв'ячно-дискового екструдера, яка забезпечує інтенсивні розтягування, стискання та зсув мікро- і макрооб'ємів розплаву перероблюваного матеріалу, внаслідок чого поліпшується змішувально-диспергувальна ефективність екструдера (рис. 6.7).

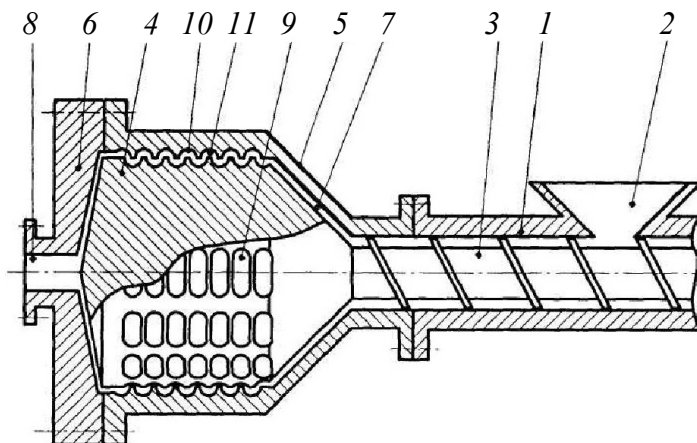


Рис. 6.7. Конструкції дискового екструдера зі складеним обертовим диском (пат. України № 46781 U [47]): 1 – корпус; 2 – завантажувальний отвір; 3 – черв'як; 4 – диск; 5 – дискова частина корпуса; 6 – дискова кришка; 7 – дискова порожнина; 8 – розвантажувальний отвір; 9; 10 – заглиблення; 11 – хвилові канали

Черв'ячно-дисковий екструдер складається з циліндричного корпуса 1 з завантажувальним отвором 2 і вставленим у ньому черв'яком 3, кінцева частина якого виконана у вигляді диска 4. До корпуса прикріплена дискова частина 5, яка разом з дисковою кришкою 6 утворює дискову порожнину 7 і вихідний отвір 8. На відповідних циліндричних поверхнях рухомого диска й дискової частини корпуса 1 виконано заглиблення 9 і 10, відповідно, які під час обертання диска 4 утворюють наскрізні хвилові канали 11.

Вихідна сировина, що підлягає переробленню, надходить у завантажувальний отвір 2.

вальний отвір 2 корпусу 1, де захоплюється нарізкою черв'яка 3, стискається і піддається пластикації. Далі розплав під тиском потрапляє в дискову порожнину 7, з якої він потрапляє в хвильові канали 11, у яких він розподіляється на більш дрібні потоки внаслідок поступового з'єднання кожного із заглиблень 9, які розташовані на рухомому диску 4, з відповідним заглибленням 10, які розташовані на нерухомій дисковій частині 5. Оскільки диск 4 обертається, то відбувається безперервне зміщення заглиблень 9 відносно заглиблень 10 на нерухомій дисковій частині 5 з утворенням хвильових каналів, безперервне об'єднання елементарних об'ємів матеріалу з утворенням нових поверхонь поділу й безперервним збільшенням поверхні контакту елементарних об'ємів розплаву, за рахунок чого досягається висока ефективність змішування. Після цього окремі потоки матеріалу з хвильових каналів потрапляють в другу дискову зону, де вони об'єднуються в один потік і піддаються інтенсивному зсуву, рухаючись до розвантажувального отвору 8. Весь процес змішування в дискових і хвильових каналах 11 супроводжується інтенсивним дисипативним виділенням енергії за рахунок великих значень швидкостей зсуву, що дає можливість підтримувати автогенний режим роботи цієї зони. Таким чином, екструдер дозволяє підвищити ефективність і якість змішування в'язких полімерних компонентів з різними інгредієнтами за рахунок нескладної модернізації традиційного черв'ячно-дискового екструдера.

У патенті [45] наведено черв'ячно-дисковий екструдер з розташованими в дисковому каналі тілами обертання, які поліпшують ефективність змішування розплаву (рис. 6.8).

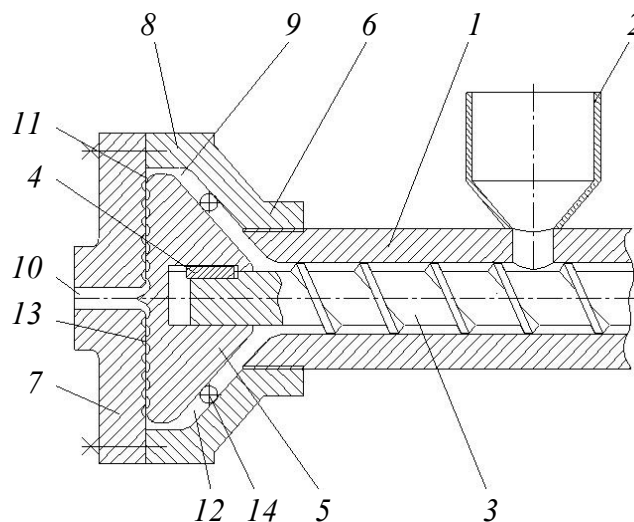


Рис. 6.8. Конструкції дискового екструдера зі складеним обертовим диском (пат. України № 37376 U [45]): 1 – корпус; 2 – завантажувальний отвір, 3 – черв'як; 4 – шпонка; 5 – обертовий диск; 6 – дискова частина корпусу; 7, 8 – нерухомі диски; 9 – дискова порожнина; 10 – випускний отвір; 11, 12 – дискові канали; 13 – заглиблення; 14 – тіла обертання

Екструдер складається з циліндричного корпусу 1 із завантажувальним отвором 2, у якому встановлено черв'як 3, на кінці якого за допомогою шліців або шпонки 4 закріплено обертовий диск 5 з можливістю осьового руху. Корпус 1 має дискову частину 6, що складається з нерухомих дисків 7 і 8, з'єднаних між собою з утворенням дискової порожнини 9 з вихідним отвором 10, які разом з рухомим диском 5 утворюють дискові канали 11 і 12, що сполучаються між собою, завантажувальним отвором 2 і вихідним отвором 10. Дискові канали 11 і 12 мають змінну висоту внаслідок можливості осьового руху рухомого диска 5. Пару торцевих поверхонь нерухомого 8 і рухомого 5 дисків споряджено заглибленнями 13, які під час обертання черв'яка 3 з рухомим диском 5 утворюють наскрізні хвильові канали для проходження полімеру, що з'єднують гвинтовий канал між корпусом 1 і черв'яком 3 з вихідним отвором 10. У дисковій порожнині 9 між рухомим диском 5 і дисковою частиною 6 встановлені тіла обертання 14.

Вихідний матеріал, що підлягає переробленню, надходить у завантажувальний отвір 2 корпусу 1, де захоплюється нарізкою черв'яка 3. Далі розплав полімеру подається під тиском в дискову порожнину 9, що утворена нерухомими дисками 7 і 8. Потік маси в порожнині 9 проходить по дискових каналах 11 і 12. Під дією перепаду тиску полімеру рухомий диск 5, який обертається разом з черв'яком 3, притискається до нерухомого диска 8. Розплав потрапляє в заглиблення 13 на торцях рухомого 5 та нерухомого 8 дисків і під час обертання черв'яка 3 перетікає з одного поглиблення 13 в інше у результаті їх послідовного почергового з'єднання та роз'єднання і переміщується до виходу крізь отвір 10. Оскільки диск 5 обертається безперервно, то безперервно відбувається й утворення нових поверхонь поділу й безперервне збільшення поверхні контакту елементарних порцій розплаву, за рахунок чого досягається висока ефективність змішування. Наявність тіл обертання 14 у дисковій порожнині 9 між рухомим диском 5 і дисковою частиною 6 компенсує прогин черв'яка 3 та сприяє концентричності нерухомих дисків 7 і 8 з рухомим диском 5, а отже й поліпшенню стабільності та довговічності роботи екструдера та зменшує осьове навантаження на черв'як 3. Крім того, завдяки коловому руху тіла обертання 14 додатково змішують матеріал.

У патенті [42] запропоновано конструкцію черв'ячно-дискового екструдера, конструкція якого забезпечує можливість регулювання геометрії робочого каналу, а отже – розширяє технологічні можливості екструдера в цілому (рис. 6.9).

Пропонований екструдер містить споряджений завантажувальним 1 і розвантажувальним 2 отворами корпус 3, у порожнині 4 якого з можливістю обертання змонтовано черв'як 5 з диском 6 на кінці (рис. 6.8,а). Черв'як 5 споряджено одним (рис. 6.8,б) або двома (рис. 6.8,в) додатковими дисками 7, при цьому між сусідніми дисками (дисками 6 і 7, або дисками 7) черв'яка 5 у порожнині 4 корпусу 3 змонтовано нерухомий диск 8 з утворенням каналів 9 між ним і дисками 6 і 7 черв'яка 3.

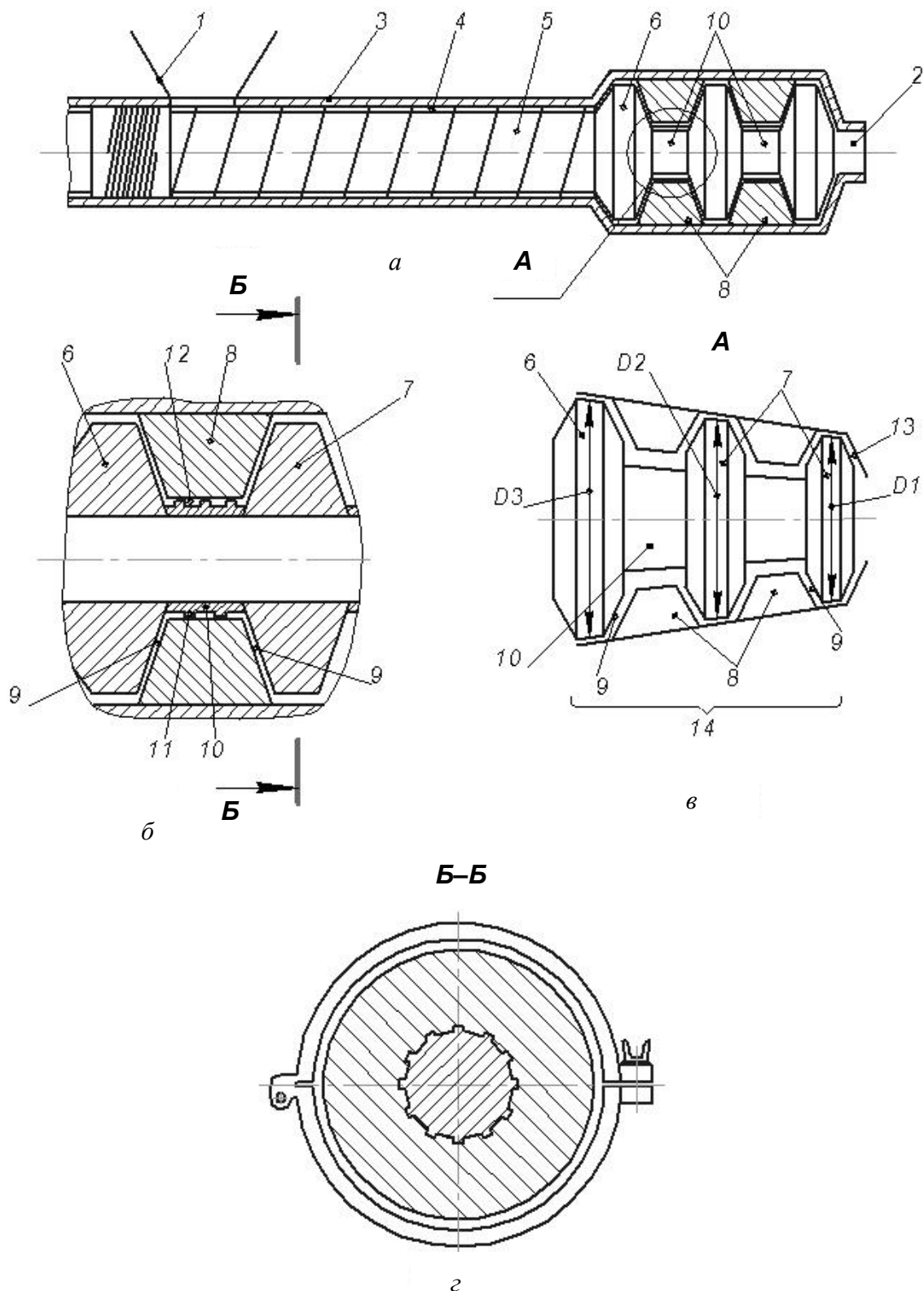


Рис. 6.9. Конструкції дискового екструдера зі складеним обертовим диском (пат. України № 27461 U [42]): 1, 2 – завантажувальний і розвантажувальний отвори, відповідно; 3 – корпус; 4 – порожнина корпусу; 5 – черв’як; 6 – основний диск; 7 – додатковий диск; 8 – нерухомий диск; 9 – канал; 10 – дистанційна втулка; 11 – зовнішня гвинтова нарізка; 12 – канал; 13 – конічна твірна; 14 – ділянка розташування нерухомих дисків

Між сусідніми дисками (дисками 6 і 7, або дисками 7) черв'яка 5 (див. рис. 6.9,б) і сусідніми нерухомими дисками 8 (див. рис. 6.9,в) можуть бути встановлені дистанційні втулки 10. Одна або декілька дистанційних втулок 10 можуть бути закріплені нерухомо відносно черв'яка 5 (наприклад, за допомогою шліцьового з'єднання) і споряджені зовнішньою гвинтовою нарізкою 11 з утворенням каналу 12 між ним і нерухомим диском 8 (див. рис. 6.9,б). Зовнішні поверхні дисків 6 і 7 черв'яка 5 можуть бути розташовані на одній конічній твірній 13, при цьому діаметр дисків 6 і 7 зменшується в напрямку розвантажувального отвору 2 корпусу 1: $D_1 < D_2 < D_3$ (див. рис. 6.9,в). Також корпус 3 на ділянці 14 розташування нерухомих дисків 8 може бути виконано різним по довжині (рис. 6.9,г).

Вихідний матеріал, що підлягає переробленню, надходить у завантажувальний отвір 1 корпусу 3, де захоплюється нарізкою черв'яка 5 і далі транспортується в напрямі ділянки 14 розташування дисків 6–8. Завдяки наявності на черв'яку 5 дисків 6 і 7, а в корпусі – відповідних нерухомих дисків 8 зона інтенсивного деформування оброблюваного матеріалу в екструдері суттєво збільшується. Після проходження ділянки 14 оброблений матеріал крізь розвантажувальний отвір 2 корпусу 1 потрапляє в екструзійну формувальну головку.

Комбінуючи розмір та/або форму дисків 6–8, можна забезпечити ефективне перероблення найрізноманітніших матеріалів.

У патенті [43] запропоновано конструкцію черв'ячно-дисково-черв'ячного екструдера, у якому нове конструктивне виконання його робочих органів (черв'яка, диска, корпусу) забезпечує можливість регулювання геометрії робочого каналу, утворюваного зазначеними робочими органами, а отже – розширяє технологічні можливості екструдера (рис. 6.10).

Екструдер містить споряджений завантажувальним 1 і розвантажувальним 2 отворами корпус 3, у порожнині 4 якого з можливістю обертання розміщено черв'як 5 з диском 6 у середній частині черв'яка 5. Диск 6 поділяє черв'як 5 на дві частини: переддискову 7 і задискову 8 (рис. 6.10,а). Черв'як 5 при цьому містить осердя 9 із закріпленими на ньому диском 6 і спорядженими гвинтовою нарізкою 10 втулками 11 (рис. 6.10,б), корпус 3 у місці розташування диска 6 виконано різним по довжині, частини 12 і 13 корпусу 3 при цьому з'єднано між собою за допомогою фланців 14 і 15, між якими розміщено втулку 16, при цьому фланці 14 і 15, а також диск 6 розміщені з утворенням між ними дискових проміжків 17 і 18, що сполучаються між собою (рис. 6.10,а,в,г).

При цьому сполучення дискових проміжків 17 і 18 може бути реалізовано за допомогою кільцевого проміжку 19 між втулкою 16 і диском 6 (рис. 6.9,в) або наскрізних каналів, виконаних у диску 6 у вигляді наскрізних отворів 20 (рис. 6.10,г,д) або пазів 21 на його периферії (рис. 6.10,е). В останніх випадках (див. рис. 6.10,г–е) втулка 16 корпусу 3 і диск 6 розміщені без утворення між ними кільцевого проміжку. За умови же наявності кільцевого проміжку 19 між втулкою 16 і диском 6 (див. рис. 6.10,в) зовнішня поверхня диска 6 може бути споряджена гвинтовою нарізкою 22.

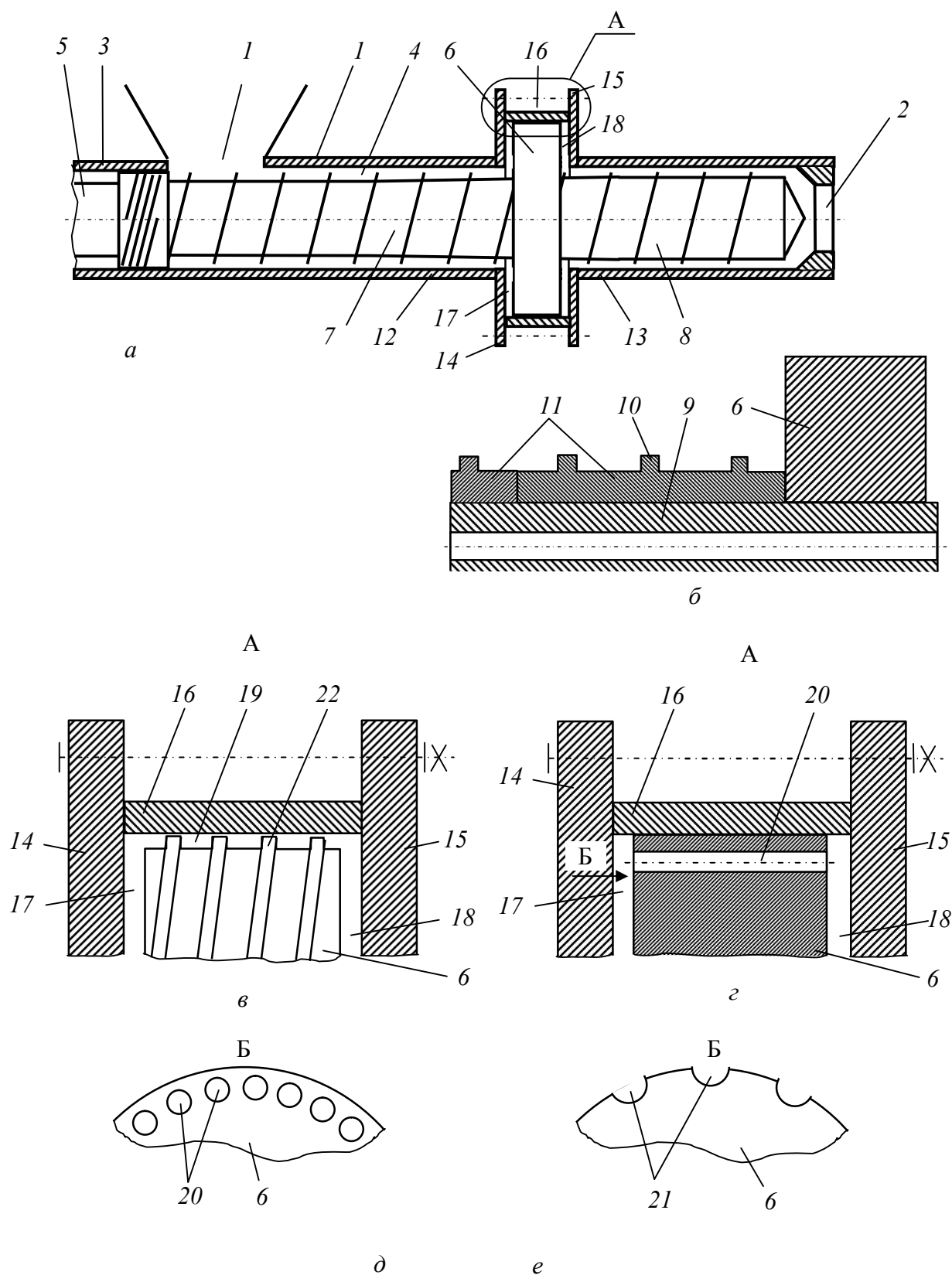


Рис. 6.10. Конструкції дискового екструдера зі складеним обертовим диском (пат. України № 32428 U [43]; пояснення за текстом)

Вихідний матеріал, що підлягає переробленню, надходить у завантажувальний отвір 1 корпусу 3, де захоплюється нарізкою переддислової частини 7 черв'яка 5 і далі транспортується в напрямі диска 6. Оброблюваний матеріал інтенсивно деформується в дискових проміжках 17 і 18, що сприяє його швидкому плавленню. Після проходження ділянки диска 6 розплавлений матеріал захоплюється нарізкою задислової частини 7 черв'яка 5, остаточно гомогенізується і під тиском крізь розвантажувальний отвір 2 корпусу 1 потрапляє в екструзійну формувальну головку (не показана).

Комбінуючи розмір та/або форму диска 6, фланців 14 і 15, а також втулки 16 корпусу 3, можна забезпечити ефективне перероблення найрізноманітніших матеріалів.

У патенті [44] запропоновано конструкцію черв'ячно-дискового екструдера, у якому нове конструктивне виконання його робочих органів забезпечує можливість багаторазово поділяти потік перероблюваного матеріалу на окремі струминки з подальшим їх об'єднанням у суцільний потік, що сприяє інтенсивному перемішуванню розплаву і суттєвому підвищенню його якості (рис. 6.11).

Екструдер містить споряджений завантажувальним 1 і розвантажувальним 2 отворами корпус 3, у порожнині 4 якого з можливістю обертання змонтовано черв'як 5 із щонайменше двома дисками 6 на кінці, при цьому між кожними сусідніми дисками 6 черв'яка 5 у порожнині 4 корпусу 3 змонтовано нерухомий диск 7 з утворенням проміжків 8 між ним і дисками 6 черв'яка 5 (рис. 6.11,а). Усі диски 6 черв'яка 5 і нерухомі диски 7 або їх частина виконані з наскрізними каналами 9, діаметр d кожного з яких менше від ширини b проміжків 8, утворених дисками 6 і 7, при цьому ширина b проміжків 8 зменшується від центра 10 дисків 6 і 7 до їх периферії 11 з боку поверхні 12 диска 6 черв'яка 5, повернутої до завантажувального отвору 1 корпусу 3, і збільшується від периферії 11 дисків 6 і 7 до їх центра 10 з боку поверхні 13 диска 6 черв'яка 5, повернутої до розвантажувального отвору 2 корпусу 3 (рис. 6.11,б).

Вихідний матеріал, що підлягає переробленню, надходить у завантажувальний отвір 1 корпусу 3, де захоплюється нарізкою черв'яка 5 і далі транспортується в напрямі ділянки розташування дисків 6 і 7. Завдяки наявності на черв'яку 5 дисків 6, а в корпусі 3 – нерухомих дисків 7 зона інтенсивного деформування оброблюваного матеріалу в екструдері суттєво збільшується. Після проходження зазначеної ділянки оброблений матеріал крізь розвантажувальний отвір 2 корпусу 1 потрапляє в екструзійну формувальну головку.

Завдяки тому, що діаметр d наскрізних каналів 9 менше від ширини b проміжків 8, утворених дисками 6 і 7, нерозплавлені гранули не потрапляють у

наскрізні канали 9 і не забивають їх, а інтенсивно плавляться в проміжках 8. При цьому термопласт, багаторазово поділяючись на окремі струминки в наскрізних каналах 9 з боку поверхонь 12 дисків 6 черв'яка 5 і знову об'єднуючись у суцільний потік у проміжках 8 з боку поверхонь 13 дисків 6 черв'яка 5 (див. рис. 6.11,б), інтенсивно перемішується, що суттєво підвищує якість розплаву.

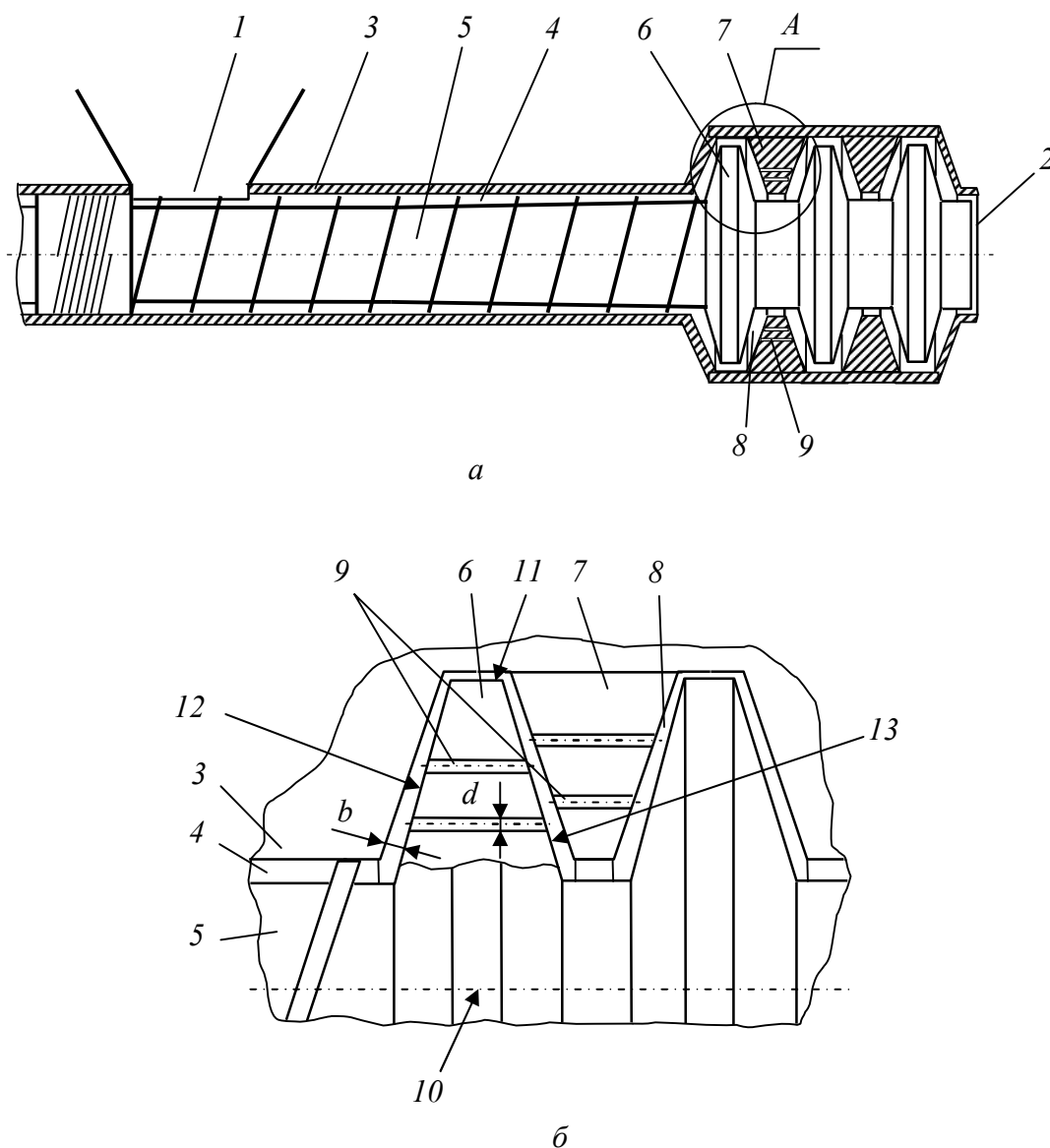


Рис. 6.11. Конструкції дискового екструдера зі складеним обертовим диском (пат. України № 34828 U [44]; пояснення за текстом)

Регулюючи розмір та/або кількість дисків 6, 7, проміжків 8 і наскрізних каналів 9, можна забезпечити ефективне перероблення найрізноманітніших матеріалів.

6.3. Технологічна лінія на базі каскадного дисково-шестеренного екструдера

Одним з основних недоліків дискових екструдерів є пульсація розплаву та його незначний тиск на виході з екструдера, що часто не дає змоги продавлювати матеріал крізь формувальний інструмент, а також одержувати продукцію високої якості. Прагнення дослідників і конструкторів усунути зазначені недоліки привело до створення комбінованих дискових екструдерів, з усієї різноманітності конструктивних рішень яких найбільш прийнятним є комбінація послідовно сполучених між собою дискового екструдера та шестеренного насоса [18]. Такий каскадний дисково-шестеренний екструдер вирізняється високою якістю підготовки розплаву, точністю його дозування та можливістю забезпечення значного тиску, достатнього для продавлювання високогомогенізованого розплаву крізь довільний формувальний інструмент.

Розроблений каскадний дисково-шестеренний екструдер (рис. 6.12) містить такі основні елементи: шнековий дозатор 4, безпосередньо дисковий екструдер 7 і спеціально розроблений з коригованим зачепленням нагнітальний дозувальний шестеренний насос 10 [10].

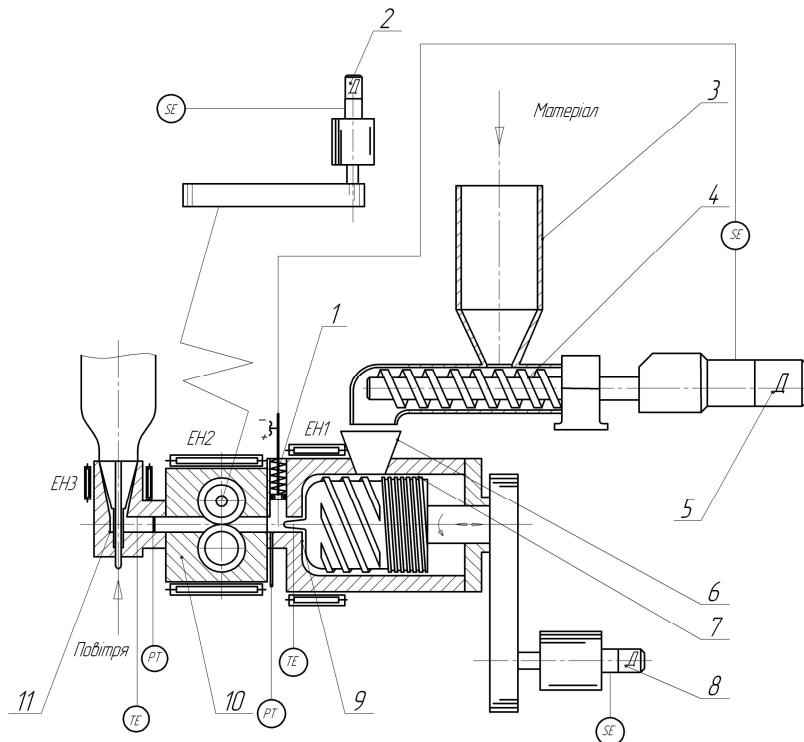


Рис. 6.12. Схема каскадного дисково-шестеренного екструдера: 1 – компенсатор; 2, 5, 8 – приводи обертових органів екструдера; 3 – бункер; 4 – шнековий дозатор; 6 – завантажувальна горловина; 7 – дисковий екструдер; 9 – торцевий робочий зазор дискового екструдера; 10 – шестеренний насос; 11 – формувальний інструмент, ЕН1, ЕН2, ЕН3 – нагрівники дискового екструдера, шестеренного насоса й формувального інструмента, відповідно

Особливістю розробленого екструдера є те, що всі його три основні елементи споряджено приводами 2, 5, 8 з можливістю безступінчастого регулювання частоти обертання їхніх робочих органів, а також встановлення між дисковим екструдером і шестеренним насосом компенсатора 1, який має зворотній зв'язок з приводом дозатора та узгоджує продуктивність дозатора і шестеренного насоса.

Перероблювана полімерна сировина з бункера 3 дозується в завантажувальний отвір 6 дискового розплавлювача-гомогенізатора, де вона захоплюється багатозахідною гвинтовою нарізкою завантажувально-пластикувальної зони диска, розігрівається за рахунок енергії дисипації і у вигляді напіврозплаву надходить у торцевий робочий зазор 9, де завершується плавлення полімеру й гомогенізація розплаву. Під дією створюваного в шестеренному насосі 10 вакууму, а також тиску, що забезпечується спорядженою нарізкою завантажувально-пластикувальною зоною диска та ефектом Вайссенберга в торцевому робочому зазорі, розплав заповнює міжзубні западини шестерень, які під час обертання забезпечують сталу продуктивність і тиск розплаву, потрібний для його проходження крізь формувальний інструмент 11.

У найбільш поширених одночерв'ячних екструдерах масова продуктивність і якість розплаву залежать від узгодженої роботи зон подавання, плавлення та гомогенізації, що забезпечується необхідною геометрією зон черв'яка та температурним режимом і часто порушується в результаті зміни типу перероблюваної сировини, її насипної густини або опору формувального інструменту. У цьому разі необхідно встановлювати черв'як з відповідною геометрією або істотно знижувати продуктивність екструдера.

Цих недоліків можна уникнути в разі застосування зазначеного каскадного дисково-шестеренного екструдера, у якому перебіг процесів подавання сировини, її плавлення й гомогенізації одержуваного розплаву можна регулювати незалежно один від одного. Крім того, дозування розплаву за допомогою шестеренного насоса також суттєво розширює технологічні можливості каскадного екструдера.

Продуктивність розробленого екструдера залежить від параметрів шестеренного насоса, а якість розплаву – від дискового розплавлювача-гомогенізатора і в разі потреби може бути відкоригована частотою обертання диска, величиною робочого зазору або їх комбінацією.

Основні параметри розробленого екструдера наведено в табл. 6.1.

Під час проведення попередніх досліджень екструдера у складі лінії для виробництва рукавної плівки ЛРП-600, змінюючи частоти обертання робочих органів дозатора, дискового екструдера й шестеренного насоса, були досягнуті стабільні технологічні режими перероблення поліетилену високого тиску марки 15803-020 (рис. 6.13).

Таблиця 6.1. Технічні параметри каскадного дисково-шестеренного екструдера

Найменування параметра	Показник
Перероблюваний матеріал	Поліетилен марки 15803-020
Максимальна масова продуктивність у складі лінії для виробництва рукавної плівки, кг/год	40
Діаметр шнека дозатора, мм	50
Частота обертання шнека дозатора, об/хв	0–50
Діаметр диска, мм	150
Частота обертання диска, об/хв	22,5–225,0
Діапазон регулювання робочого зазору, мм	0,5–5,0
Кількість шестеренних коліс	2
Модуль зачеплення, мм	2,25
Кількість зубів	20
Ширина зуба, мм	32
Частота обертання шестерень, об/хв	0–45
Опір формувальної головки, МПа	15–25
Встановлена потужність, кВт	
– шнекового дозатора	0,8
– дискового екструдера	7,5
– шестеренного насоса	2,2
– електричних нагрівників	3,5

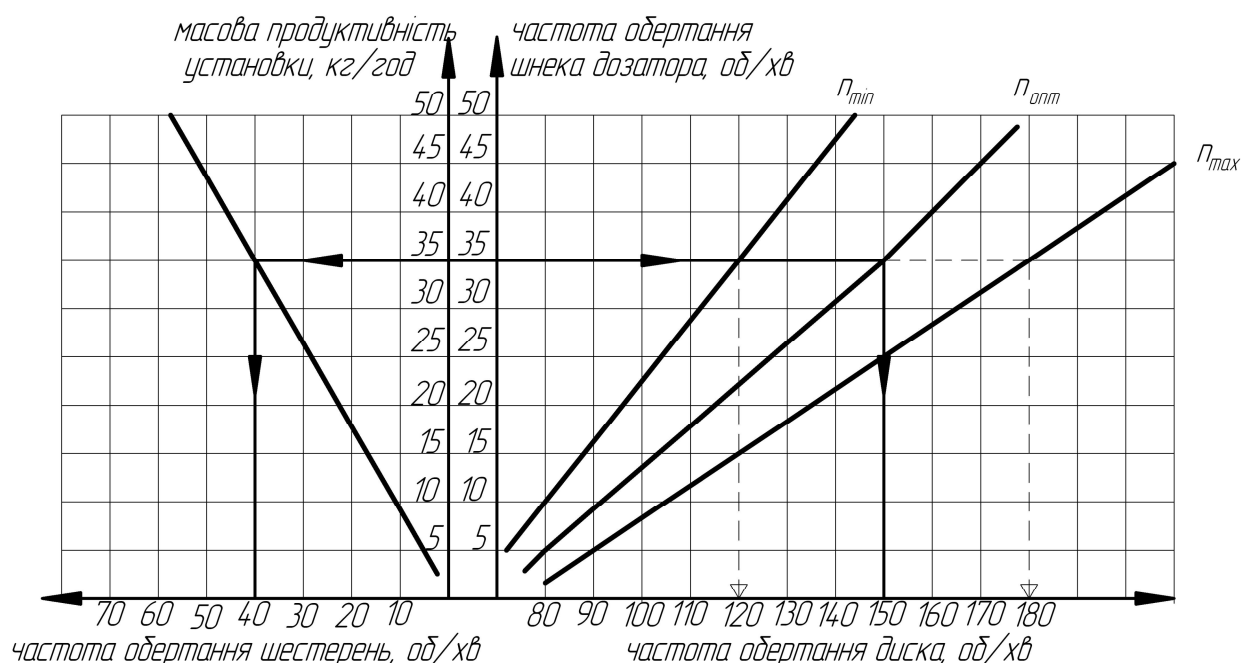


Рис. 6.13. Номограма для визначення режиму роботи дисково-шестеренного екструдера під час переробки поліетилену марки 15803-020: n_{\max} , $n_{\text{опт}}$, n_{\min} – максимальна, оптимальна і мінімальна частота обертання диска, об/хв

З рис. 6.13 видно, що за заданої масової продуктивності екструзійної установки, наприклад 35 кг/год, мають бути встановлені такі частоти обертання (об/хв): шнековий дозатор – 35, дисковий екструдер – 150, шестеренний насос – 40. Величина робочого зазору при цьому має становити 2,5 мм. У разі потреби частоти обертання диска можна змінювати від 120 до 180 об/хв, а робочий зазор – від 0,5 до 5,0 мм за незмінної масової продуктивності екструдера.

Попередні дослідження розробленого екструдера у складі лінії для грануляції поліетилену, поліпропілену, полістиролу та поліаміду, а також полімерних композицій на їхній основі з додаванням пігментів, барвників, скловолокна, тирси та інших наповнювачів показали, що високий ступінь однорідності композицій може бути досягнутий за значно менших питомих енергетичних витрат, ніж під час використання традиційних черв'ячних екструдерів з робочими органами, спорядженими складними змішувальними елементами.

Аналіз отриманих зразків плівки показав, що вони відповідають вимогам відповідної нормативної документації, при цьому товщина плівки при продуктивності 35 кг/год може становити 8–10 мкм, у той час як плівка, одержана на цій самій лінії, але укомплектованою черв'ячним екструдером ЧП45×25, має товщину не менше від 25–30 мкм за вищих на 15–20 % питомих енерговитрат.

ВИСНОВКИ

Головний науковий результат монографії – вирішення науково-технічної проблеми створення наукових засад розробки та вдосконалення обладнання та процесів переробки термопластичних матеріалів у дискових екструдерах та агрегатах з їх застосуванням (черв'ячно-дискових, дисково-шестеренних екструдерах і технологічних ліній на їх базі), що забезпечує можливість визначення раціональних конструктивних параметрів обладнання та режимів його роботи, а отже – заощадження енергетичних і матеріальних ресурсів.

Основні результати виконаної роботи такі:

1. Розглянуто основні особливості приготування й перероблення полімерних композиційних матеріалів. Показано, що найбільш універсальним методом перероблення зазначених матеріалів є екструзія – неперервний технологічний процес перероблення формувальної суміші, який полягає в розм'якшенні матеріалу під дією підвищеної температури й наданні йому потрібної форми продавлюванням крізь головку екструдера. Розглянуто загальні засади моделювання екструдерів.

2. Розроблено математичну модель процесу течії ньютонівського матеріалу в завантажувально-пластикувальній зоні дискового розплавлювача, а також алгоритм розрахунку модуля плавлення.

3. Розроблено математичну модель процесу течії ньютонівського матеріалу в процесу в зазорі між дисками дискових і комбінованих екструдерів, а також алгоритм розрахунку зазначеного процесу. Наведено результати експериментальних досліджень дискового розплавлювача.

4. Здійснено програмну реалізацію запропонованих алгоритмів. Розроблено пакети прикладних програм.

5. Розроблена методика інженерного розрахунку черв'ячно-дискових екструдерів як керівний технічний матеріал РТМ 0220612-022-88 ПАТ «НВП „Більшовик”» (м. Київ).

6. На підставі розроблених алгоритмів і пакета прикладних програм виконано детальне дослідження зазначеного обладнання. На підставі аналізу процесів дискової та комбінованої екструзії запропоновано численні технічні рішення, захищені охоронними документами на винаходи й корисні моделі.

ДОДАТОК А

ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ДИСКОВОГО ЕКСТРУДЕРА

```

CLS
' Dsk1 Розрахунок дискового екструдера
' з розрахунком швидкісних та температурних полів
PRINT " Введіть вхідні дані для розрахунку"
h1 = .006: f = 17.7: h2 = .0035: d1 = .03: alf = 60
e = .005: lb = .06: zd = 8: nz = 1.5
gm = 100: fr = .9: tb = 20: tp = 110: ttp = 160
ih = 41900: ela = 2
' При sw=0 - розрахунок швидкісних полів за методом Горнера
sw = 0
DEF fnc (t) = 1738.5 + 2.527 * t
DEF fnr (t) = 832 + .067 * t - .00302 * t ^ 2 + 5.24E-06 * t ^ 3
DEF fnla (t) = .20886 + 6.943E-05 * t
DEF fnip (t) = 388000 + (1738.5 + 2.527 * t) * (t - 110)
DEF fnm (g, t) = 40600 * g ^ (-.7) * EXP(-.00998 * (t - 120))

m = 50: m1 = m + 1
DIM p(m1), q(m1), s(m1), t(m1), qv(m1), w(m1), wz(m1)
DIM gx(m1), c(m1), ro(m1), la(m1), tau(m1)
f = f * 3.14 / 180: sn = SIN(f): cn = COS(f)
rt = .65 * fnr(tp): d = .1: alf = SIN(alf * 3.14 / 180)
a1 = gm / (60 * h1 * zd * rt * lb * fr)
a2 = 60 / (3.14 * sn * (2 * h1 / 9.81) ^ .5)
b = (d * a1 / a2) ^ .5: d6 = zd * (b - e) / (3.14 * sn)
IF d > d6 THEN 2
1 :
d = d6: b = (d * a1 / a2) ^ .5
2 :
n = a1 / b: dk = d1 + .5 * (d + d1): dlm = .001
lm = 2 * gm / (60 * n * h1 * b * zd * rt) * sn: h = h1
212 :
lm = lm + dlm
g = gm / (3600 * zd)
dl = .002: l = 0: dz = dl / sn: nb = 0: nd = 0: gp = 0
vt = g / (rt * b * h1)
v = 3.14 * d * n / 60: vx = v * sn: vz = v * cn
gpz = 0: stz = 0: hz = .0002: tcz = tp: b1 = b: gt = g

```

```

gps1 = 0: sts = 0: hs = hz: tcs = tp: gps = 0: jh = 0
3 :
l = l + dl
‘
‘      Початок модуля плавлення

vj = (vz - vt) ^ 2 + vx ^ 2: jh = jh + 1
jw = 0: jt = 1
4 :
rz = fnr(tcz): lz = fnla(tcz)
rs = fnr(tcs): ls = fnla(tcs)
jt = jt + 1
9 :
gz = ((vx / hz) ^ 2 + ((vz - vt) / hz) ^ 2) ^ .5: gs = vt / hs
mz = fnm(gz, tcz)
ms = fnm(gs, tcs)
jw = jw + 1
tq = mz * vj / (2 * lz) + qz * hz / lz + tp
dgpz = rz * hz * dz * vx / 2
gt1 = gt - dgpz
b1 = gt1 / (vt * h1 * rt)
IF b1 < b THEN b1 = b
ai = vx * rz * (fnip(tp) - ih) / (2 * b1)
di = qz ^ 2 + 4 * ai * mz * vj: f2 = (qz + di ^ .5) / (2 * ai)
ee = ABS(hz - f2) / f2: hz = f2
dns1 = ms * dz * vt ^ 2 / hs: dgps1 = dns1 / (fnip(tcs) - ih)
f2 = (gps1 + dgps1) / (vt / 2 * rs): e1 = ABS(f2 - hs) / f2: hs = f2
IF jw > 20 THEN 10
IF e1 > ee THEN ee = e1
IF ee > .01 THEN 9
10 :
f1 = mz * vj / (3 * lz) + qz * hz / (2 * lz) + tp
ee = ABS(f1 - tcz) / f1: tcz = f1
f1 = ms * vt ^ 2 / (3 * ls) + tp: e1 = ABS(f1 - tcs) / f1: tcs = f1
IF jt > 20 THEN 11
IF e1 > ee THEN ee = e1
IF ee > .01 THEN 4
11 :
gpz = gpz + dgpz: gps1 = gps1 + dgps1: gg = dgps1 * b1
gps = gps + gg: gt = g - gpz - gps
stz = stz + tcz * dgpz: sts = sts + tcs * gg: tk = (stz + sts) / (gpz + gps)

```

```

t = (stz + sts + gt * tb) / g: nx = dgpz * (fnip(tc) - ih)
bn = qz * 3.14 * d * dl: nb = nb + bn: gp = gpz + gps
nx = dgpz * (fnip(tc) - ih) + dns1 * b1 - bn: nd = nd + nx

```

‘ Кінець модуля плавлення

```

IF l < lm THEN 3
IF gp < .6 * g THEN 212

```

```

nb = zd * nb: nd = zd * nd
rd = d / 2: h = h2
rb = fnr(s3): dy = h / m: dr = .005
gp = gp + gp * (fnip(tk) - fnip(tp)) / (fnip(tp) - ih)
gp = zd * gp / nz: g = gm / (3600 * nz): del = .0002: tc = tp
FOR i = 0 TO m
s(i) = tp: t(i) = tp
NEXT i

```

‘Розрахунок процесу в дисковому зазорі

```

12 :
rd = rd - dr
IF rd > dk / 2 THEN dz = dr ELSE dz = dr / alf
vx = 3.14 * rd * n / 30
ec = 0: ec1 = 0
13 :
IF gp > .95 * g THEN 30

```

‘ Розрахунок перехідної області

```

14 :
ro = fnr(tc): c = fnc(tc): la = fnla(tc)
17 :
ec1 = ec1 + 1: mj = fnm(vx / del, tc)
del1 = SQR(2 * mj * vx * 3.14 * rd / (ro * (fnip(tc) - ih)))
eps = ABS(del1 - del) / del1: del = (del + del1) / 2
IF ec1 < 20 THEN 18
ec1 = 0: GOTO 19
18 : IF eps > .01 THEN 17
19 :
tc1 = tp + mj * vx ^ 2 / (12 * la)
eps = ABS(tc1 - tc) / tc1: tc = (tc + tc1) / 2
IF ec < 20 THEN 20
ec = 0: GOTO 21

```

```

20 : IF eps > .01 THEN 14
21 :
dgp = ro * vx / 4 * del * dz: gp = gp + 2 * dgp
nd = nd + 2 * dgp * (fnip(tc) - ih): del3 = del * 1000
GOTO 39
‘ Кінець розрахунку перехідної області
‘ Розрахунок швидкісних полів
30 :
vx = 3.14 * rd * n / 30
IF sw = 0 THEN 511
FOR i = 0 TO m
gx(i) = vx / h
NEXT i
GOTO 111

511 :
dta = .5 * fnm(vx / h, tc) * (vx / h)
tau = 0: j = 0
51 :
tau = tau + dta
FOR i = 0 TO m
gx(i) = 0: dga = .5 * vx / h: y = 0: dy = h / m
52 :
gx(i) = gx(i) + dga
tau1 = fnm(gx(i), s(i)) * gx(i)
ep = tau - tau1
IF ABS(ep / tau) < .05 THEN 53
IF ep > 0 THEN 52
gx(i) = gx(i) - dga: dga = dga / 3: GOTO 52
53 :
NEXT i
w(0) = 0
FOR i = 1 TO m
w(i) = w(i - 1) + gx(i) * dy
NEXT i
ep = w(m) - vx
IF ABS(ep / vx) < .05 THEN 111
IF ep < 0 THEN 51
tau = tau - dta: dta = dta / 3: GOTO 51
111 :
‘ Кінець розрахунку швидкісних полів

```

‘ Розрахунок температурних полів

ec = ec + 1: ep = 0: dnd = 0: y = 0

FOR i = 0 TO m

qv(i) = fnm(gx(i), s(i)) * gx(i) ^ 2

dnd = dnd + qv(i) * 2 * 3.14 * rd * dy * dz

ro(i) = fnr(s(i)): c(i) = fnc(s(i)): la(i) = fnla(s(i))

la(i) = la(i) * ela

wz(i) = 3 * g / (fnr(s(i)) * 3.14 * rd * h ^ 3) * (h * y - y ^ 2)

y = y + dy

NEXT i

e1 = -la(0) / dy - dy * c(0) * ro(0) * wz(i) / (2 * dz)

p(0) = -la(0) / (dy * e1)

e2 = -dy * qv(0) / 2 - dy * ro(0) * c(0) * wz(i) * t(0) / (2 * dz)

q(0) = e2 / e1

FOR i = 1 TO m - 1

e1 = ro(i) * c(i) * wz(i) / dz

e1 = e1 + 2 * la(i) / (dy ^ 2) - la(i) * p(i - 1) / (dy ^ 2)

p(i) = la(i) / (dy ^ 2 * e1)

e2 = la(i) * q(i - 1) / (dy ^ 2) + qv(i) + ro(i) * c(i) * wz(i) * t(i) / dz

q(i) = e2 / e1

NEXT i

e1 = la(m) / dy + dy * c(m) * ro(m) * wz(i) / (2 * dz)

p(m) = la(m) / (dy * e1)

e2 = dy * qv(m) / 2 + dy * ro(m) * c(m) * wz(i) * t(m) / (2 * dz)

q(m) = e2 / e1

tt = (q(m - 1) * p(m) + q(m)) / (1 - p(m - 1) * p(m))

eps = ABS(tt - s(m)) / tt: s(m) = tt

IF eps > ep THEN ep = eps

FOR i = m - 1 TO 0 STEP -1

tt = p(i) * s(i + 1) + q(i): eps = ABS(tt - s(i)) / tt: s(i) = tt

IF eps > ep THEN ep = eps

NEXT i

IF ec < 20 THEN 37

ec = 0: GOTO 38

37 :

IF ep > .001 THEN 30

38 :

IF gp > .95 * g THEN 39

gp = gp + dnd / (fnip(tp) - ih) * nz

39 :

nd = nd + nz * dnd: ts = 0

```

FOR i = 0 TO m
ts = ts + s(i): t(i) = s(i)
NEXT i
ts = ts / m1
‘ Кінець розрахунку температурних полів

PRINT USING "r=#### ts=#### d=##### nd=#####"; rd; ts; d; nd
FOR i = 0 TO m STEP m / 10
PRINT USING " ####"; t(i);
NEXT i
PRINT
IF rd > d1 / 2 THEN 12
‘ Вибір нового наближення діаметра диска
IF ts < ttp THEN 40
IF (g - gp) < .05 * g THEN 41
40 :
d = d + .005: b = (d * a1 / a2) ^ .5
d6 = zd * (b + e) / (3.14 * sn)
IF d6 > d THEN 1 ELSE 2
41 :
dd = 1000 * d: bd = 1000 * b: dk = 1000 * dk
nb = .001 * nb: ndd = .001 * nd: nd = ndd * 1.1 / .8: lm1 = 1000 * lm
‘13 :
PRINT
PRINT "  Результати розрахунку екструдера"
PRINT
PRINT USING " продуктивність екструдера    ### кг/год"; gm
PRINT USING " діаметр диска                ###.# мм"; dd
PRINT USING " ширина каналу нарізки        ###.# мм"; bd
PRINT USING " число заходів нарізки         #"; zd
PRINT USING " діаметр конуса диска          ###.# мм"; dk
PRINT USING " число обертів диска           ###.# 1/хв"; n
PRINT USING " довжина робочої зони нарізки   ##### мм"; lm1
PRINT USING " потужність на диску           #####.# кВт"; ndd
PRINT USING " потужність приводу            #####.# кВт"; nd
PRINT USING " температура розплаву          ###.# град С"; ts
FOR i = 0 TO m STEP m / 10
PRINT USING " ####"; t(i);
NEXT i
PRINT
END

```

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Басов Н. И.* Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов : учеб. для вузов / Н. И. Басов, Ю. В. Казанков, В. А. Любартович. — М. : Химия, 1986. — 488 с.
2. *Бернхардт Э.* Переработка термопластичных материалов / Э. Бернхардт. — М. : Госхимиздат, 1968. — 748 с.
3. *Бондаренко В. Н.* Исследование процессов экструзии полиамидов в комбинированном червячно-дисковом экструдере : автореф. дис. на соиск. учён. степ. канд. техн. наук : спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химической технологии» / В. Н. Бондаренко. — К., 1977. — 20 с.
4. *Виноградов Г. В.* Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. — М. : Химия, 1977. — 440 с.
5. *Демидович Б. П.* Численные методы анализа / Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова. — М. : Наука, 1967. — 368 с.
6. Дисковые экструдеры / [Ю. Г. Остапчук, М. Л. Язловицкий, К. К. Бачинский и др.]. — К. : Техника, 1972. — 132 с.
7. *Дослідження енергоресурсозаощаджувальної технології та засобів формування виробів з композиційних матеріалів : звіт про НДР (заключ.) : 2367 / Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т» ; кер. Л. Б. Радченко ; викон.: В. В. Сівецький [та ін.]. — К., 2002. — 162 с. — № ДР 0101U000402.*
8. *Жук Н. К.* Анализ устойчивости процесса дисковой экструзии / Н. К. Жук, В. Л. Кочеров, Э. А. Спорягин // Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб. — К. : Техніка, 1975. — Вып. 33. — С. 62—71.
9. *Жук Н. К.* Исследование устойчивости и стабильности процесса дисковой экструзии : автореф. дис. на соиск. учён. степ. канд. техн. наук : спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химической технологии» / Н. К. Жук. — К., 1979. — 24 с.
10. *Каскадный дисково-шестеренный экструдер для переработки полимерных материалов / И. О. Микулёнок, Н. В. Мурдид, Д. М. Швед, М. П. Швед // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2009. — № 2. — С. 74—77.*
11. *Каскадный червячно-дисковый экструдер и эффективность его применения в линиях по производству труб, пленок, листов : [обзор. информ.] / Ю. Е. Лукач, Н. П. Швед, Ю. Г. Остапчук, К. К. Бачинский. — М. : ЦИНТИ-химнефтемаш, ХМ-2, 1983. — 15 с. — (Серия ХМ-2 «Оборудование для переработки пластмасс и резины»).*
12. *Кац Г. С., Милевски Д. В.* Наполнители для полимерных композиционных материалов: Справ. пособие; Пер. с англ. / Под ред. П. Г. Бабаевского. — М.: Химия, 1981. — 736 с.

13. *Ким В. С.* Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс / В. С. Ким, В. В. Скачков. — М. : Химия, 1988. — 239 с.
14. *Ким В. С.* Теория и практика экструзии полимеров / В. С. Ким. — М. : Химия, 2005. — 568 с.
15. *Корн Г.* Справочник по математике (для научных работников и инженеров). Определения, теоремы, формулы. — [6-е изд., стер.] / Г. Корн, Т. Корн. — СПб. : Изд-во «Лань», 2003. — 832 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература).
16. *Кочеров В. Л.* Диссипативные параметры процесса дисковой экструзии. / В. Л. Кочеров, Ю. Е. Лукач, Э. А. Спорягин // Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб. — К. : Техніка, 1972. — Вып. 16. — С. 41—44.
17. *Кочеров В. Л.* Исследование комбинированного червячно-дискового экструдера : автореф. дис. на соиск. учён. степ. канд. техн. наук : спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химической технологии» / В. Л. Кочеров. — К., 1971. — 23 с.
18. *Лукач Ю. Ю.* Дослідження шестеренчастого насоса як нагнітального пристрою дискового екструдера для переробки полімерних матеріалів / Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок, М. В. Сезонов // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2001. — № 3. — С. 136—139.
19. *Мак Келви Д. М.* Переработка полимеров / Д. М. Мак Келви. — М. : Химия, 1965. — 442 с.
20. *Малкин А. Я.* Реология: концепции, методы, приложения / А. Я. Малкин, А. И. Исаев. — СПб. : Профессия, 2007. — 560 с.
21. *Маракулін О. О.* Дослідна установка на базі каскадного двощілинного черв'ячно-дискового екструдера / О. О. Маракулін, І. О. Мікульонок, М. П. Швед // Хімічна промисловість України. — 2008. — № 3. — С. 58—60.
22. *Миани М.* Оборудование для производства полимерных листов и плит из полиолефинов с наполнением древесной мукой / М. Миани : семинар «Итальянское оборудование по переработке пластика и резины», (Киев, 18.05.1993) : доклад. — К. : Отдел по развитию торгового обмена Посольства Италии в Украине, 1993. — 18 с.
23. *Микулёнок И. О.* Классификация термопластических композиционных материалов и их наполнителей / И. О. Микулёнок // Пластические массы. — 2012. — № 9. — С. 29—38.
24. *Микулёнок И. О.* Моделирование процесса дисковой экструзии термопластов / И. О. Микулёнок, Л. Б. Радченко // Химическая промышленность. — 2012. — Т. LXXXIX (89), № 1. — С. 31—38.

25. *Микулёнок И. О.* Определение реологических свойств термопластичных композиционных материалов / И. О. Микулёнок // Пластические массы. — 2011. — № 7. — С. 26—30.
26. *Микулёнок И. О.* Определение теплофизических свойств термопластичных композиционных материалов / И. О. Микулёнок // Пластические массы. — 2012. — № 7. — С. 9—13.
27. *Мікульонок І. О.* Класифікація процесів та обладнання одержання безперервних виробів з термопластичних матеріалів / І. О. Мікульонок // Вісник НТУУ «КПІ». Напрямок «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». — 2010. — № 2 (6). — С. 5—11.
28. *Мікульонок І. О.* Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології : підруч. [для студ. вищ. навч. закл.]. — К.: НТУУ «КПІ», 2014. — 337 с.
29. *Мікульонок І. О.* Моделювання обладнання технологічних ліній для перероблення пластмас і гумових сумішей на базі валкових машин : монографія / І. О. Мікульонок. — К. : НТУУ «КПІ», 2013. — 243 с.
30. *Мікульонок І. О.* Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини : монографія / І. О. Мікульонок. — К. : ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2009. — 265 с.
31. *Мікульонок І. О.* Переробка вторинної сировини екструзією : монографія / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко. — К. : ІВЦ «Видавництво „Політехніка”», 2006. — 184 с.
32. *Мікульонок І. О.* Процеси та обладнання перероблення термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини : дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.17.08 «процеси та обладнання хімічної технології» / Мікульонок Ігор Олегович. — К., 2009. — 388 с.
33. *Мікульонок І. О.* Технологічні основи перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей : навч. посіб. / І. О. Мікульонок. — К. : НТУУ «КПІ», 2015. — 312 с.
34. *Милдман С.* Течение полимеров / С. Милдман ; пер. с англ. Ю. Н. Панова ; под ред. А. Я. Малкина. — М. : Мир, 1971. — 264 с.
35. *Мировой и европейский рынок пластмасс* // *Plastics Review (Ukraine Edition)*. — 2005. — С. 4—8.
36. *Основи проектування одночерв'ячних екструдерів* : навч. посіб. / І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко. — К. : НТУУ «КПІ», 2015. — 200 с.
37. *Основы технологии переработки пластмасс* : учебник для вузов / [С. В. Власов, Э. Л. Калинин, Л. Б. Кандырин и др.] ; под ред. В. Н. Кулезнёва и В. К. Гусева. — М. : Химия, 2004. — 596 с.

38. Остапчук Ю. Г. Исследование параметров дисковых экструдеров / Ю. Г. Остапчук, В. Ф. Дубовицкий, Л. Л. Гончар // Полимерное оборудование и переработка пластмасс : науч.-техн. сб. – К. : Техника, 1974. — С. 3—9.

39. Пат. 6506 U Україна, МПК⁷ B29C 47/52. Дисковий екструдер / І. О. Мікульонок, І. М. Доценко ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 20040907438 ; заявл. 13.09.04 ; опубл. 16.05.05, Бюл. № 5.

40. Пат. 7449 U Україна, МПК⁷ B29C 47/52. Дисковий екструдер / А. В. Горовець, І. О. Мікульонок, В. О. Новік, Л. Б. Радченко ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 20041210495 ; заявл. 20.12.04 ; опубл. 15.06.05, Бюл. № 6.

41. Пат. 14499 U Україна, МПК(2006) B29C 47/36. Дисковий екструдер / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко, Н. Л. Радченко, М. П. Швед ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 200511317 ; заявл. 29.11.05 ; опубл. 15.05.06, Бюл. № 5.

42. Пат. 27461 U Україна, МПК(2006) B29C 47/00. Екструдер / М. М. Бігун, Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко, О. В. Саманчук ; заявники і патентовласники – вони же. — № 200708703 ; заявл. 30.07.07 ; опубл. 25.10.07, Бюл. № 20.

43. Пат. 32428 U Україна, МПК(2006) B29C 47/00. Екструдер / Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 200801090 ; заявл. 30.01.08 ; опубл. 12.05.08, Бюл. № 9.

44. Пат. 34828 U Україна, МПК(2006) B29C 47/00. Екструдер / О. О. Маракулін, І. О. Мікульонок, М. П. Швед ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 200803179 ; заявл. 12.03.08 ; опубл. 26.06.08, Бюл. № 16.

45. Пат. 37376 U Україна, МПК(2006) B29C 47/36. Черв'ячно-дисковий екструдер / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок, С. М. Корнійчук ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 200807992 ; заявл. 12.06.08 ; опубл. 25.11.08, Бюл. № 22.

46. Пат. 44266 U Україна, МПК(2009) B29C 47/00. Дисковий екструдер / М. П. Швед, І. О. Мікульонок, Н. В. Мурдід, Д. М. Швед ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № 200904334 ; заявл. 30.04.09 ; опубл. 25.09.09, Бюл. № 18.

47. Пат. 46781 U Україна, МПК(2009) B29C 47/36. Черв'ячно-дисковий екструдер / В. І. Сівецький, В. Ю. Щербіна, О. Л. Сокольський, Н. Я. Кравець ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u200906012 ; заявл. 11.06.09 ; опубл. 11.01.10, Бюл. № 1.

48. Пат. 60000 U Україна, МПК(2011.01) B29C 47/00. Дисковий екструдер / І. О. Мікульонок, С. В. Сафонов, Д. М. Швед, М. П. Швед ; заявники і па-

тентовласники – вони же. — № 201013199 ; заявл. 08.11.10 ; опубл. 10.06.11, Бюл. № 11.

49. *Пат. 67295 U Україна*, МПК(2012.01) В29С 47/00. Дисковий екструдер / О. В. Петренко, М. П. Швед, Д. М. Швед ; заявники і патентовласники – вони же. — № 201109505 ; заявл. 29.07.11 ; опубл. 10.02.12, Бюл. № 3.

50. *Пат. 75728 U Україна*, МПК(2006.01) В29С 47/52. Дисковий екструдер / М. П. Швед, Р. Ю. Резнік, Д. М. Швед ; заявники і патентовласники – вони же. — № 201206793 ; заявл. 05.06.12 ; опубл. 10.12.12, Бюл. № 23.

51. *Пат. 89049 U Україна*, МПК(2014.01) В29С 47/00. Каскадний дисково-шестеренний екструдер / О. В. Плешко, М. П. Швед, Д. М. Швед ; заявники і патентовласники – вони же. — № 201312664 ; заявл. 29.10.13 ; опубл. 10.04.14, Бюл. № 7.

52. *Пат. 97551 U Україна*, МПК(2006/01) В29С 47/52. Дисковий екструдер / І. О. Мікульонок ; заявник і патентовласник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». — № u201409684 ; заявл. 04.09.14 ; опубл. 25.03.15, Бюл. № 6.

53. *Пат. 2003467 Российская Федерация*, МПК⁷ В29С 47/52. Червячно-дисковый экструдер / О. Е. Зелинский, И. О. Микулёнок, А. И. Рог, А. И. Сумский, М. Д. Тігіпко ; заявитель и патентообладатель Производственно-коммерческая фирма «ПолиЭк». — № 5028753/05 ; заявл. 25.02.92 ; опубл. 30.11.93, Бюл. № 43–44.

54. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар ; пер. с англ. под ред. В. Д. Виленского. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.

55. *Пивень А. Н.* Теплофизические свойства полимерных материалов : справочник / А. Н. Пивень, Н. А. Гречаная, И. И. Чернобыльский. — К. : Выща шк., 1976. — 180 с.

56. *Полімерні композитні матеріали й вироби з них. Одержання, перероблення та властивості : термінол. слов.* / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко. — К. : ІВЦ «Видавництво „Політехніка”», 2005. — 179 с.

57. *Радченко Л. Б.* Дослідна установка на базі каскадного двощілинного черв'ячно-дискового екструдера / Л. Б. Радченко, І. О. Мікульонок, В. О. Новік // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2004. — № 6. — С. 49—56.

58. *Радченко Л. Б.* Основи моделювання та конструювання черв'ячних екструдерів : навч. посіб. / Л. Б. Радченко, В. І. Сівецький. — К. : ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2002. — 152 с.

59. *Радченко Л. Б.* Переробка термопластів методом екструзії : монографія / Л. Б. Радченко. — К. : ІЗМН, 1999. — 220 с.

60. *Раувендааль К.* Экструзия полимеров / У. Раувендааль; пер. с англ. под ред. А. Я. Малкина. — СПб. : Профессия, 2006. — 768 с.

61. *Рынок пластмасс и изделий из пластмасс в Украине* // Международные новости мира пластмасс. — 2006. — № 11—12. — С. 4, 6, 8—10, 12—14.
62. *Рябинин Д. Д.* Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей / Д. Д. Рябинин, Ю. Е. Лукач. — М. : Машиностроение, 1972. — 272 с.
63. *Рябинин Д. Д.* Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей / Д. Д. Рябинин, Ю. Е. Лукач. — М. : Машиностроение, 1965. — 363 с.
64. Смешение полимеров / В. В. Богданов, Р. В. Торнер, В. Н. Красовский, Э. О. Регер. — Л. : Химия, 1979. — 192 с.
65. *Тадмор З.* Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос ; пер. с англ. под ред. Р. В. Торнера. — М. : Химия, 1984. — 632 с.
66. *Теплофизические* и реологические характеристики и коэффициенты трения наполненных термопластов : справочник / [В. А. Пахаренко, В. Г. Зверлин, В. П. Привалко и др.]. — К. : Наук. думка, 1983. — 290 с.
67. *Теплофизические* и реологические характеристики полимеров : справочник / [А. И. Иванченко, В. А. Пахаренко, В. П. Привалко и др.]. — К. : Наук. думка, 1977. — 244 с.
68. *Техника* переработки пластмасс / под ред. Н. И. Басов и В. Броя. — М. : Химия, 1985. — 528 с.
69. *Торнер Р. В.* Оборудование заводов по переработке пластмасс : учеб. пособие [для студентов вузов] / Р. В. Торнер, М. С. Акутин. — М. : Химия, 1986. — 400 с.
70. *Торнер Р. В.* Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) / Р. В. Торнер. — М. : Химия, 1977. — 464 с.
71. *Фридман М. Л.* Развитие оборудования для смешения расплавов термопластов : [обзор. информ.] / М. Л. Фридман. — М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1988. — 51 с. — (Серия ХМ-2 «Оборудование для переработки пластмасс и резины»).
72. *Швед Н. П.* Экспериментальная установка для исследования процессов переработки термопластов на каскадном экструдере / Н. П. Швед // Химическое машиностроение : респ. межвед. научн.-техн. сб. — К. : Техніка, 1982. — Вып. 36. — С. 24—30.
73. *Шенкель Г.* Шнековые прессы для пластмасс. Принцип действия, конструирования и эксплуатации / Г. Шенкель ; пер. с нем. Г. П. Делекторского, И. С. Либермана, А. Н. Перфилетова ; под ред. А. Я. Шапиро. — Л. : Госхимиздат, 1962. — 467 с.
74. *Яхно О. М.* Гідравліка неньютонівських рідин : навч. посіб. / О. М. Яхно, В. І. Желяк. — К. : Вища шк., 1995. — 199 с.
75. *Balsam M.* Kunststoff – der Werkstoff des 21 Jahrhunderts / M. Balsam, C.-J. Simon // Kunststoffe. — 2001. — Bd 91, N 8. — S. 46.

76. *Beyer G.* Nanocomposites – a new concept for flame retardant polymers / G. Beyer // *Polym. News.* — 2001. — Vol. 26, N 11. — P. 370—378.
77. *Carotenuto G.* Polymer-based nanocomposites: New potentialities for polymers / G. Carotenuto // *Polym. News.* — 2000. — Vol. 25, N 6. — P. 190—199.
78. *Fiber-reinforced* plastic market to cross 2.6 billion by 2007 // *Polym. News.* — 2002. — Vol. 27, N 11. — P. 388—389.
79. *Grünschloß E.* Einfluss des Schneckenspiels auf die Verfahrensparameter bei Einschnecken – Plastifizier – Extrudern / E. Grünschloß // *Kunststoffe.* — 1987. — Bd 77, N 9. — S. 888—892.
80. *Lindt J. T.* Mathematical modeling of melting of polymers in a single-screw extruder a critical review / J. T. Lindt // *Polymer Engineering & Science.* — 1985. — Vol. 25, N 10. — P. 585—588 (DOI: 10.1002/pen.760251002).
81. *Martin G.* Beitrag zur Bestimmung der Aufschmelzlinge in Gewindengang einer Einschneckenpresse / G. Martin // *Kunststofftechnik.* — 1969. — Bd 8, N 7. — S. 238—246.
82. *Mikulionok I. O.* Simulation of Disk Extruder Operation / I. O. Mikulionok, L. B. Radchenko // *Russian Journal of Applied Chemistry.* — 2012. — Vol. 85, No. 9. — P. 1475—1481 (DOI: 10.1134/S1070427212090273).
83. *Pearson J. R. A.* On the Melting of Solids Near a Hot Moving interface, with Particular Reference to Beds of Granular Polymers / J. R. A. Pearson // *Int. J. Heat Mass. Transfer.* — 1976. — Vol. 19. — P. 405—411.
84. *Sikora J. W.* Influence of the length of the plasticating system on selected characteristics of an autothermal extrusion process / J. W. Sikora, E. Sasimowski // *Adv. Polym. Technol.* — 2005. — Vol. 24, N 1. — P. 21—28.
85. *Tadmor Z.* Machine invention, innovation, and elementary steps / Z. Tadmor // *Adv. Polym. Technol.* — 2002. — Vol. 21, N 2. — P. 87—97.
86. *Tadmor Z.* Fundamentals of plasticating extrusion. I. A theoretical model for melting / Z. Tadmor // *Polymer Engineering & Science.* — 1966. — Vol. 6, N 3. — P. 185—190.
87. *Tadmor Z.* Melting in Plasticating Extruders Theory and Experiments / Z. Tadmor, I. J. Duvdevani, I. Klein // *Polym. Eng. Sci.* — 1967. — Vol. 7. — P. 198—217.
88. *Thermoplastic* polymers reinforced with fibrous agricultural residues / S. Th. Georgopoulos, P. A. Tarantili, E. Avgerinos [et al.] // *Polym. Degrad. and Stab.* — 2005. — Vol. 90, N 2. — P. 303—312.
89. *Todd D. B.* Improving incorporation of fillers in plastics. A special report / D. B. Todd // *Adv. Polym. Technol.* — 2000. — Vol. 19, N 1. — P. 54—64.
90. *Tolinski M.* Glass fiber meets stiffer competition / M. Tolinski // *Plast. Eng.* — 2005. — Vol. 61, N 3. — P. 18—20.

ЗМІСТ

Вступ	3
Перелік умовних позначень, символів і скорочень	5
1. Особливості приготування і перероблення полімерних композиційних матеріалів	7
1.1. Характеристика наповнювачів композиційних матеріалів на основі полімерів	7
1.2. Методи перероблення композиційних матеріалів	13
2. Загальні засади моделювання екструдерів	24
3. Моделювання завантажувально-пластикувальної зони дискового розплавлювача	28
3.1. Принципова схема дискового розплавлювача	28
3.2. Математична модель завантажувально-пластикувальної зони дискового розплавлювача	29
3.3. Алгоритм розрахунку модуля плавлення	45
4. Моделювання процесу в зазорі між дисками	48
5. Алгоритм розрахунку дискового розплавлювача та його експериментальна перевірка	60
5.1. Алгоритм розрахунку дискового розплавлювача	60
5.2. Експериментальні дослідження дискового розплавлювача	64
6. Удосконалення конструкцій дискових і черв'ячно-дискових екструдерів	68
6.1. Дискові екструдери	68
6.2. Черв'ячно-дискові та черв'ячно-дисково-черв'ячні екструдери	76
6.3. Технологічна лінія на базі каскадного дисково-шестеренного екструдера	84
Висновки	88
Додаток А. Програма розрахунку дискового екструдера	89
Список використаної літератури	95

ДЛЯ НОТАТОК

[illegible]

Наукове видання

Мікульонок Ігор Олегович
Радченко Леонід Борисович

**МОДЕЛЮВАННЯ ДИСКОВИХ ЕКСТРУДЕРІВ
ДЛЯ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ
МАТЕРІАЛІВ**

Монографія

В авторській редакції
Надруковано з оригінал-макета замовника